

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR DE ECONOMIA E GESTÃO

MESTRADO EM: Economia e Política da Energia e do Ambiente

REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA PORTUGUESA

HELENA MARGARIDA MARTINS

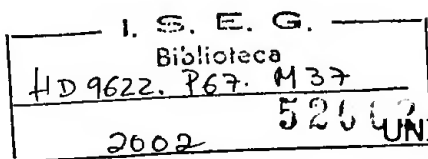
Orientação:

Doutor Luís Filipe Canhão Roriz

Júri:

Doutor Álvaro Gonçalves Martins Monteiro
Doutor Jorge Fernando de Almeida Dias Delgado
Doutor Luís Filipe Canhão Roriz

Maio/2002

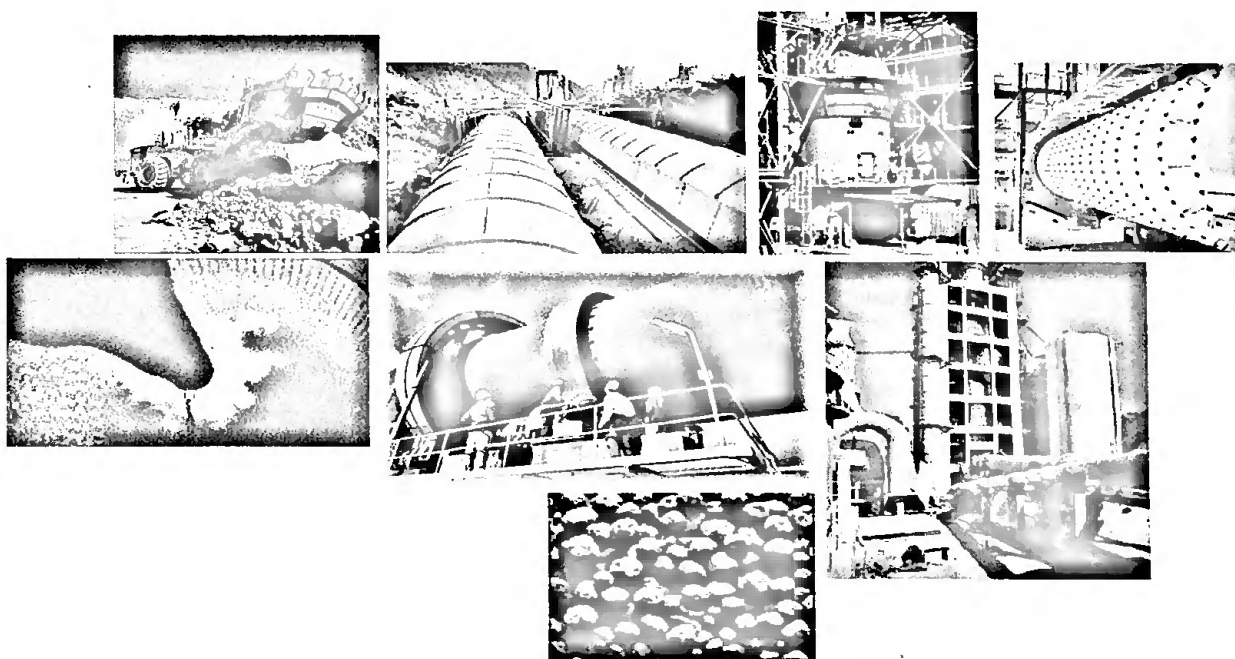


UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR DE ECONOMIA E GESTÃO

MESTRADO EM: Economia e Política da Energia e do Ambiente

REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA PORTUGUESA

HELENA MARGARIDA MARTINS



Orientação:

Doutor Luís Filipe Canhão Roriz

Júri:

Doutor Álvaro Gonçalves Martins Monteiro

Doutor Jorge Fernando de Almeida Dias Delgado

Doutor Luís Filipe Canhão Roriz

Maio/2002



RESUMO

A indústria cimenteira é um dos sectores mais intensivos em energia da economia Portuguesa. É também um sector intensivo em capital, dados os custos elevados com a energia e o facto de exigir grandes investimentos na construção das instalações e na aquisição e manutenção do equipamento básico. Actualmente, os principais impactes ambientais associados à produção de cimento são a exploração das pedreiras e as emissões de poluentes atmosféricos e de gases com efeito de estufa.

O presente trabalho analisa a indústria cimenteira nacional, inserindo-a num contexto global, no que respeita à produção, consumo de energia e impactes ambientais. São caracterizadas as melhores tecnologias disponíveis actualmente para a produção de cimento e identificadas as áreas de actual investigação e desenvolvimento (I&D).

Seleccionou-se a cimenteira da Secil no Outão como caso-estudo, para a qual se caracteriza a situação actual e se estuda a implementação de novas tecnologias e medidas para melhorar a eficiência energética. Para cada tecnologia e medida energeticamente eficientes são calculados os custos de investimento e de operação, as poupanças energéticas e o efeito nas emissões de dióxido de carbono (CO_2). Como medidas e tecnologias principais a implementar com vista ao aumento da eficiência energética foram seleccionadas a introdução de pré-calcinador e arrefecedor de grades no sistema de queima, e a utilização de prensas de rolos para a moagem de clínquer. Para diminuir os impactes ambientais resultantes das emissões de CO_2 e de óxidos de azoto (NO_x) sugere-se o aumento da produção de cimentos compostos e a implementação da redução não-catalítica selectiva, respectivamente.

Palavras-Chave: indústria cimenteira, clínquer, energia, melhores tecnologias disponíveis, dióxido de carbono.

ABSTRACT

The cement industry is one of the most energy-intensive sectors in the Portuguese economy. It is also a capital-intensive sector, given the energy high costs and the fact of demanding big investments in the plant construction and basic equipment acquisition and maintenance.

Currently, the main environmental impacts associated with cement production are the quarry exploration and the emissions of atmospheric pollutants and greenhouse gases.

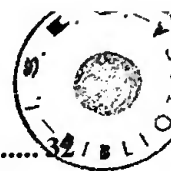
The present study analyses the national cement industry, inserting it in a global context, in what concerns production, energy consumption and environmental impacts. The best available technologies for cement production are characterized and the main areas of research and development (R&D) are identified.

The Secil's cement plant at Outão was selected as case study. The plant current situation is characterized and the implementation of new technologies and measures to increase energy efficiency are studied. The investment and operation costs, the energy savings and the effects on carbon dioxide (CO₂) emissions are calculated for each energy-efficient technology and measure. As main measures and technologies to implement for obtaining increased energy efficiency, the introduction of a pre-calcinator and grate cooler were selected for the burning system, and the roller presses were selected for cement grinding. To decrease the environmental impacts of releasing CO₂ and nitrogen oxides (NO_x), it is suggested the increase of blended cements production and the implementation of selective non-catalytic reduction, respectively.

Key words: cement industry, clinker, energy, best available technologies, carbon dioxide.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	4
GLOSSÁRIO DE ABREVIATURAS.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE QUADROS.....	11
AGRADECIMENTOS	12
1. INTRODUÇÃO	13
2. A INDÚSTRIA CIMENTEIRA	15
2.1 Resumo Histórico.....	15
2.2 Processos e Técnicas Aplicadas na Produção de Cimento	16
2.2.1 Extracção, Armazenamento e Preparação das Matérias Primas.....	16
2.2.2 Armazenamento e Preparação de Combustíveis	19
2.2.3 Queima do Clínquer	20
2.2.4 Moagem e Armazenamento do Cimento	24
2.2.5 Controlo do Processo e da Qualidade.....	25
2.3 Principais Aspectos Ambientais	25
2.3.1 Consumo de Recursos Naturais	26
2.3.2 Consumo de Energia	27
2.3.3 Emissões	27



3. CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL DA INDÚSTRIA

CIMENTEIRA MUNDIAL.....	32
3.1 Produção e Consumo de Cimento	33
3.2 Consumo de Energia.....	35
3.3 Principais Impactes Ambientais	38

4. CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL DA INDÚSTRIA

CIMENTEIRA PORTUGUESA.....	41
4.1 Produtores de Cimento	41
4.1.1 CIMPOR.....	41
4.1.2 SECIL.....	43
4.2 Consumo de Cimento.....	45
4.3 Produção de Cimento.....	46
4.3.1 Tipos de Cimento Produzidos	49
4.4 Comércio Externo	50
4.5 Consumo de energia.....	51
4.6 Impactes Ambientais	58
4.6.1 Emissões de Partículas	58
4.6.2 Emissões de NOx	59
4.6.3 Emissões de SO ₂	60
4.6.4 Emissões de CO	61
4.6.5 Emissões de CO ₂	62
4.6.6 Compromissos Assumidos.....	64
5. MELHORES TÉCNICAS DISPONÍVEIS E I & D	65

5.1	Melhores Técnicas Disponíveis para a Produção de Cimento	65
5.1.1	Preparação das Matérias Primas	66
5.1.2	Produção de Clínquer	67
5.1.3	Moagem do Cimento	68
5.1.4	Medidas Gerais	69
5.2	Melhores Técnicas Disponíveis para o Controle de Emissões	70
5.2.1	Partículas	71
5.2.2	Óxidos de Azoto (NO _x)	72
5.2.3	Dióxido de Enxofre (SO ₂)	76
5.2.4	Dióxido de Carbono (CO ₂)	77
5.3	Outras Técnicas	79
5.3.1	Co-Geração	79
5.3.2	Co-Incineração	80
5.4	Investigação e Desenvolvimento (I&D)	81
5.4.2	Tecnologias de Fragmentação Avançadas	81
5.4.3	Redução Catalítica Selectiva	82
5.4.4	Gestão de Picos de CO para Precipitadores Electrostáticos	82
5.4.5	Polímeros Minerais	83
5.4.6	Remoção de CO ₂ dos Gases Libertados	83
6.	LEGISLAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL APLICÁVEL	85
6.1	Legislação Nacional	85
6.1.1	Legislação Energética	85
6.1.2	Legislação Ambiental	86
6.2	Legislação Comunitária	90
6.3	Comparação da Legislação Nacional com a de Outros Países Europeus	91

7. CASO-ESTUDO SECIL-OUTÃO: ANÁLISE ENERGÉTICA, AMBIENTAL E ECONÓMICA.....	92
7.1 Caracterização da Situação Actual	92
7.1.1 Processo de Fabrico e Equipamentos Utilizados na Produção.....	92
7.1.2 Equipamentos de Protecção e Monitorização Ambiental.....	98
7.1.3 Produção de Cimento	98
7.1.4 Consumos Energéticos	100
7.1.5 Impactos Ambientais.....	102
7.1.6 Síntese	105
7.2 Selecção e Análise da Introdução de Novos Processos e Tecnologias	107
7.2.1 Consumos de Energia.....	107
7.2.2 Impactos Ambientais.....	112
7.2.3 Co-Incineração.....	114
8. CONCLUSÃO	119
BIBLIOGRAFIA.....	122
ANEXOS	

GLOSSÁRIO DE ABREVIATURAS

BAT	“Best available technique” – melhor tecnologia disponível
Cd	Cádmio
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
COV	Compostos orgânicos voláteis
DGE	Direcção Geral da Energia
DGQA	Direcção Geral da Qualidade do Ambiente
DL	Decreto-Lei
FE	Factor de emissão
FM	Filtro de mangas
GEE	Gases com efeito de estufa
HCl	Cloreto de hidrogénio
HF	Fluoreto de hidrogénio
Hg	Mercúrio
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control
kgep	Quilograma equivalente de petróleo
N ₂	Azoto
NH ₃	Amoníaco
NO	Óxido de azoto
NO ₂	Dióxido de azoto
NO _x	Óxidos de azoto
O ₂	Oxigénio
PE	Precipitador electrostático
RGCE	Regulamento de Gestão do Consumo de Energia
RIP	Resíduos industriais perigosos
SO ₂	Dióxido de enxofre
tep	Tonelada equivalente de petróleo
Ti	Titânio
TVV	Transmissões de velocidade variável
UE	União Europeia
VAB	Valor acrescentado bruto

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Processo de via-seca típico
- Figura 2 - Forno rotativo
- Figura 3 - Tipos de sistema de queima
- Figura 4 - Balanço mássico para a produção de 1 kg de cimento
- Figura 5 - Uso de energia nos diferentes passos de produção de cimento
- Figura 6 - Evolução da produção mundial de cimento, de 1970 a 2000
- Figura 7 - Produção de cimento por região mundial no ano 2000
- Figura 8 - Produção de cimento na União Europeia em 1998
- Figura 9 - Consumo específico de combustível em alguns países da UE e média da UE
- Figura 10 - Consumo de combustíveis nas cimenteiras europeias em 1995
- Figura 11 - Emissões de CO₂ e emissões específicas de CO₂, em 1994.
- Figura 12 - Emissões de CO₂ por unidade de cimento produzido para o processo seco, para diferentes tipos de combustíveis e rácios clínquer/cimento.
- Figura 13 - Centros de Produção da Cimpor
- Figura 14 - Centros de Produção da Secil
- Figura 15 - Evolução do consumo de cimento e do PIB
- Figura 16 - Consumo de cimento per capita em alguns países da UE, em 1998.
- Figura 17 - Evolução da produção de cimento em Portugal
- Figura 18 - Capacidades de produção instaladas por fábrica
- Figura 19 - Evolução do consumo de matérias primas no Grupo Secil
- Figura 20 - Evolução da produção de cimento e clínquer e do rácio clínquer/cimento, na Secil
- Figura 21 - Evolução da produção dos diferentes tipos de cimento em Portugal
- Figura 22 - Evolução das importações e exportações de clínquer e cimento
- Figura 23 - Consumo de energia nas principais indústrias transformadoras em 1998
- Figura 24 - Intensidade energética nas principais indústrias transformadoras em 1998
- Figura 25 - Evolução do consumo de energia na indústria cimenteira
- Figura 26 - Evolução do consumo específico de energia na indústria cimenteira
- Figura 27 - Evolução dos consumos específicos de energia térmica
- Figura 28 - Consumos específicos de energia eléctrica
- Figura 29 - Consumos específicos de energia na indústria cimenteira mundial
- Figura 30 - Comparação da prática actual e “melhor prática” respeitante a intensidades energéticas da indústria cimenteira de vários países (1988)
- Figura 31 - Valor médio de emissões de NO_x (mg/Nm³)
- Figura 32 - Valor médio de emissões de SO₂ (mg/Nm³) no grupo Cimpor
- Figura 33 - Valor médio de emissões de CO (mg/Nm³) no grupo Cimpor

- Figura 34 - Emissões de CO₂ resultantes da produção nacional de cimento
- Figura 35 - Processo de fabrico da fábrica Secil do Outão
- Figura 36 - Exploração de uma pedreira
- Figura 37 - Britador de martelos
- Figura 38 - Moinho de cru vertical
- Figura 39 - Instalações de armazenagem e pré-homogeneização de marga
- Figura 40 - Linhas de produção de clínquer
- Figura 41 - Moinho de cimento
- Figura 42 - Electrofiltro instalado no Outão
- Figura 43 - Evolução das produções de clínquer e cimento
- Figura 44 - Evolução da produção dos diferentes tipos de cimento
- Figura 45 - Evolução do consumo de combustíveis e de electricidade
- Figura 46 - Evolução do consumo específico de electricidade
- Figura 47 - Evolução do consumo específico de combustível
- Figura 48 - Evolução das emissões de partículas no Outão
- Figura 49 - Evolução das emissões de CO₂ no Outão
- Figura 50 - Evolução da intensidade em carbono e do rácio clínquer/cimento no Outão
- Figura 51 - Emissões de NO_x
- Figura 52 - Emissões de CO
- Figura 53 - Consumos e impactes ambientais em 1999

LISTA DE QUADROS

- Quadro 1 - Consumo médio de matérias primas na produção de cimento na UE
- Quadro 2 - Distribuição típica do consumo de electricidade por operação numa cimenteira
- Quadro 3 - Consumo específico de combustível para diferentes tipos de sistemas de queima
- Quadro 4 - Gamas de emissão para fornos de clínquer na Europa
- Quadro 5 - Cálculo do factor de emissão para as partículas no grupo Secil
- Quadro 6 - Cálculo do factor de emissão para o NO_x no grupo Secil
- Quadro 7 - Cálculo do factor de emissão para o CO na Secil-Outão
- Quadro 8 - Cálculo do factor de emissão de CO₂ nas cimenteiras nacionais
- Quadro 9 - Uso de energia para a preparação de matérias primas
- Quadro 10 - Uso de energia para a produção de clínquer
- Quadro 11 - Uso de energia eléctrica para o arrefecimento de clínquer
- Quadro 12 - Uso de energia para a moagem de cimento
- Quadro 13 - BATS para controle das emissões de partículas
- Quadro 14 - BATs para controle das emissões de NO_x
- Quadro 15 - BATs para controle das emissões de SO₂
- Quadro 16 - Valores de K para a produção de cimento
- Quadro 17 - Limites de emissão para o sector cimenteiro
- Quadro 18 - Limites de emissão de aplicação geral
- Quadro 19 - Comparação das normas de emissão nacionais para cimenteiras a funcionar normalmente e com as normas da UE para cimenteiras a co-incinerar resíduos
- Quadro 20 - Limites de emissão para Portugal e para outros países Europeus
- Quadro 21 - Incorporação de resíduos industriais no cimento produzido no Outão em 1999
- Quadro 22 - Equipamentos e respectivos consumos verificados no Outão no ano 2000
- Quadro 23 - Estimativas de custos das alterações ao sistema de queima
- Quadro 24 - Estimativas de alterações/novos consumos
- Quadro 25 - Estimativa dos custos com a energia verificados no ano 2000
- Quadro 26 - Alteração dos consumos de energia
- Quadro 27 - Consumos actuais de energia e consumos previstos
- Quadro 28 - Custos actuais e novos custos com a energia
- Quadro 29 - Consumos e custos com electricidade para os dois sistemas de moagem de cimento
- Quadro 30 - Custos com electricidade para os dois sistemas de moagem
- Quadro 31 - Estimativa das emissões de CO₂ no Outão, no ano 2000
- Quadro 32 - Redução das emissões de CO₂ resultantes de alterações ao sistema de queima
- Quadro 33 - Variação das emissões de CO₂ do processo com o rácio clínquer/cimento

AGRADECIMENTOS

Quero deixar expresso o meu agradecimento ao Prof. Luís Roriz, por ter aceite orientar a tese e acompanhado o trabalho efectuado.

Uma palavra de agradecimento às pessoas que permitiram que este trabalho fosse possível fornecendo algo de essencial: os dados e informações relativas à indústria cimenteira nacional. O agradecimento então ao Eng. ° Caldas Barreiro e à Eng. ª Susana Ribeiro, ambos da Secil, ao Eng. ° Serra Nazaré da Cimpor e à colega de mestrado Paula Almeida.

Uma palavra de agradecimento ao Grupo Gemac, em especial para as colegas de gabinete Oxana, Myriam e Joana, pelo acolhimento e pelas palavras de apoio, incentivo e amizade.

Uma palavra de carinho e gratidão aos meus pais, sem os quais nada teria sido possível, à Belinha e Paulo por me acolherem vezes sem conta em Lisboa e ao João pela paciência, incentivo e carinho.

1. INTRODUÇÃO

A indústria cimenteira é um sector vital para a sociedade moderna, uma vez que o cimento é um ingrediente essencial para a construção de infra-estruturas como os edifícios, túneis, pontes, estradas e outros. O sector cimenteiro tem uma elevada importância macro-económica a nível mundial e as suas características produtivas e de consumo permitem que se fale de uma actividade que tem vindo a acompanhar a globalização dos mercados. A importância do sector está fortemente relacionada com o desenvolvimento económico, posição geográfica e capacidade competitiva de cada país.

Uma das principais características da indústria cimenteira é o facto de ser uma indústria intensiva em energia, responsável por 2% do consumo de energia primária a nível mundial. A produção de cimento tem também impactes significativos no meio ambiente, com destaque para a exploração das pedreiras, fonte de matéria prima, e para as emissões atmosféricas. Numa época em que se discutem meios e mecanismos que permitam combater as alterações climáticas, a energia assume especial importância e protagonismo dadas as grandes emissões de gases com efeito de estufa (GEE) resultantes quer da sua produção quer do seu consumo. As tecnologias e os métodos de produção têm actualmente um papel crítico na redução das emissões de GEE relacionadas com a energia.

O objectivo do presente trabalho é caracterizar o sector cimenteiro nacional, inserido no contexto mundial, no que diz respeito a consumos energéticos e emissões ambientais, e identificar e estudar a implementação de medidas que permitam melhorar o seu desempenho económico, energético e ambiental.

O trabalho está dividido em 8 secções. No Capítulo 2 é dada uma visão geral sobre os processos e técnicas aplicados na produção de cimento. Os Capítulos 3 e 4 pretendem caracterizar energética e ambientalmente a indústria cimenteira a nível mundial e nível nacional, respectivamente. Aí são abordados aspectos como a produção e o consumo de cimento, o consumo de energia e os equipamentos ou processos responsáveis por esse consumo, e identificados os principais impactes ambientais e suas origens. São também calculadas as emissões de dióxido de carbono resultantes da actividade das cimenteiras nacionais. No

Capítulo 5 é feita uma análise às melhores técnicas actualmente disponíveis para a produção de cimento e às áreas de investigação e desenvolvimento em que actualmente se depositam maiores esperanças com vista à diminuição da intensidade energética e dos impactes no ambiente. O Capítulo 6 apresenta a legislação vigente em Portugal aplicável à produção de cimento e estabelece uma comparação entre a legislação nacional e a de outros países da União Europeia. No Capítulo 7 a cimenteira da Secil no Outão é abordada como caso-estudo, sendo feita a caracterização do seu desempenho energético e ambiental actual. São identificadas as áreas susceptíveis de intervenção e é estudada a aplicação de medidas, técnicas e equipamentos sempre com o objectivo de diminuir a intensidade energética e as incidências ambientais. Para cada opção identificada são quantificados custos, efeitos no consumo de energia e efeitos no ambiente, que são depois comparados com os valores actuais. Finalmente, o Capítulo 8 apresenta uma breve conclusão relativa ao trabalho desenvolvido.

2. A INDÚSTRIA CIMENTEIRA

2.1 Resumo Histórico

Desde cedo o homem procurou um material que unisse as pedras numa massa sólida e com forma determinada. Os Assírios e os Babilónios usavam o barro para este objectivo, mas foram os Egípcios os primeiros a usar materiais parecidos com o cimento quando misturaram uma forma impura de gesso com água, usando-a como agente ligante entre os blocos de pedra das pirâmides. Mais tarde, os Romanos desenvolveram um cimento resultante da mistura de cal e cinza vulcânica, pozolana, nome derivado da localidade Pozzuoli de onde era extraída, que na presença de água reagia lentamente formando uma massa dura de particular eficácia. O Coliseu e os grandiosos Banhos Romanos são exemplos da arquitectura romana dessa época que chegaram até aos nossos dias.

A Idade Média trouxe um declínio geral na qualidade e uso do cimento e só mais tarde se descobriu como produzir o cimento hidráulico. O falhanço estrutural do Farol de Eddystone ao largo da costa de Inglaterra, levou um engenheiro britânico, John Smeaton, a conduzir experiências com argamassa em águas doces e salgadas. Em 1756, Smeaton descobriu que se obtinha uma argamassa melhor quando a pozolana era misturada com calcário calcinado contendo um elevado teor de argila. Fazendo uso desta descoberta, o farol foi reconstruído.

Foi Joseph Aspdin, um construtor londrino, quem em 1824 registou a patente de um cimento hidráulico a que deu o nome de cimento portland devido à sua semelhança com uma pedra extraída da Ilha de Portland, na costa britânica. O método de Aspdin envolvia uma mistura de calcário e argila, em proporções bem definidas, pulverizada e queimada num forno que era depois triturada até ser obtido o cimento final.

Em 1844, I.C. Johnson fixa as primeiras regras rigorosas para o cálculo da mistura de matérias primas e estabelece o controlo científico do processo de fabrico de cimento. A tecnologia ligada à indústria cimenteira começa então a tomar forma, recorrendo aos esforços de vários investigadores em áreas diversificadas.

O cimento hoje mais utilizado, que mantém ainda a denominação de cimento portland, é um material na forma de um pó fino com dimensões médias da ordem dos 50µm, que resulta da

mistura de clínquer com outras substâncias tais como o gesso e escórias siliciosas, em quantidades que dependem do tipo de aplicação e características pretendidas. O clínquer, principal componente do cimento, é produzido pela transformação térmica a elevada temperatura, de uma mistura de material rochoso contendo carbonato de cálcio, dióxido de silício e óxido de alumínio, e também quantidades menores de outros constituintes como o ferro e o enxofre (CCI, 2000).

2.2 Processos e Técnicas Aplicadas na Produção de Cimento

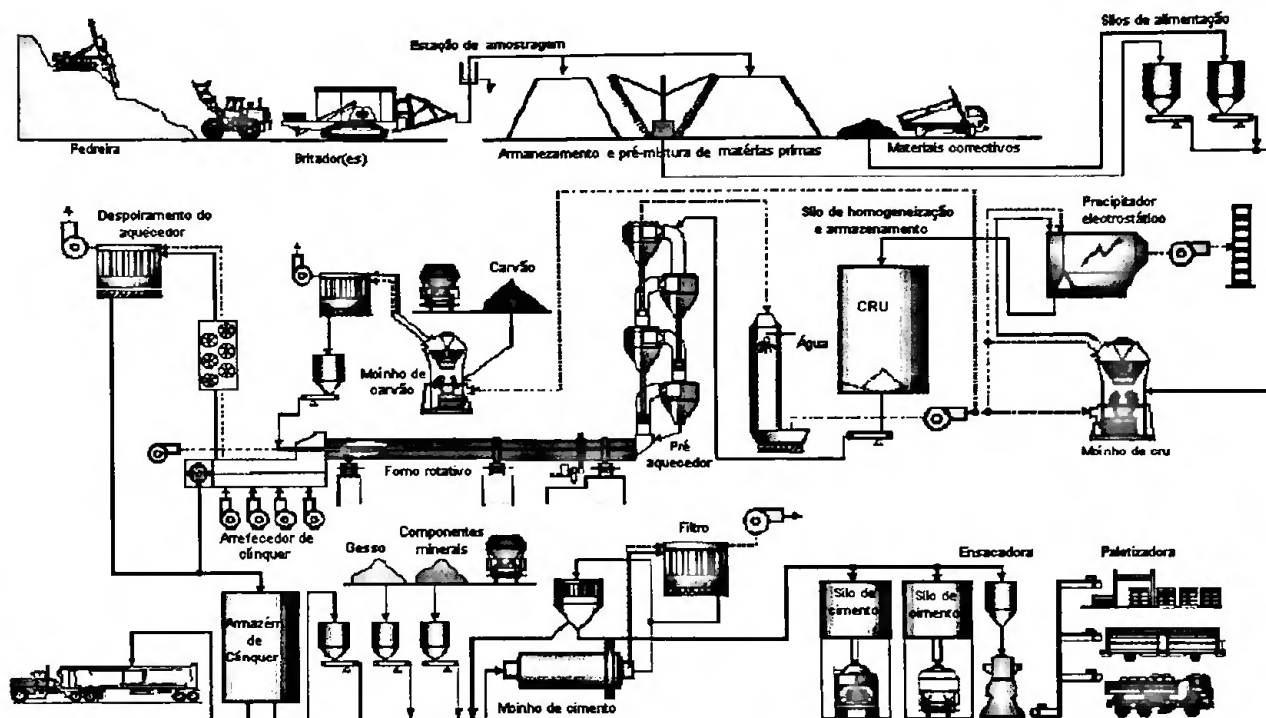
Para produzir o clínquer, constituinte principal do cimento, existem dois processos principais: a via húmida e a via seca. No processo por via húmida, antes de alimentada ao forno, a matéria prima é misturada com água, de forma a facilitar o seu manuseamento e homogeneização. O grande inconveniente desta via é o excesso de energia necessário para proceder primeiro à evaporação da água contida na matéria prima. Ainda há poucas décadas, as limitações da tecnologia cimenteira tornavam este processo a escolha obrigatória. Com os avanços tecnológicos foi-se tornando possível a preparação do cru (matérias primas homogeneizadas) usando um processo “seco”, isto é, sem adição de água. A principal vantagem deste processo sobre o anterior é o menor consumo de energia e, portanto, um custo inferior.

A crise energética do início da década de 70 forneceu o impulso necessário para a adopção generalizada da via-seca. Hoje em dia, a selecção do processo húmido só se justifica em condições de matéria prima e de processo muito específicas (Cembureau, 1999). Em Portugal actualmente todas as cimenteiras utilizam a via-seca para a produção de clínquer, pelo que este será o processo apresentado com maior detalhe. A Figura 1 ilustra o processo de via seca típico.

2.2.1 Extracção, Armazenamento e Preparação das Matérias Primas

A matéria prima principal, constituída por calcário, marga e argila, é proveniente de pedreiras geralmente localizadas na proximidade das fábricas. Na exploração das pedreiras, feita geralmente a céu aberto, a pedra pode ser extraída mecanicamente ou recorrendo a explosivos, sendo neste caso necessário efectuar perfurações. No próprio local, fazendo uso de britadores, as pedras são reduzidas a um tamanho que permita o seu transporte até à cimenteira, onde são armazenadas.

Figura 1 - Processo de via-seca típico



Adaptada de: Cembureau, 1999

Para ajustar a composição da matéria prima às necessidades do processo e especificações do produto, poderão ser usados materiais correctivos provenientes de outros locais como a bauxite, o ferro ou a areia. Para substituir parte da matéria prima natural podem também ser usados materiais alternativos originários de outras fontes industriais, como as cinzas de centrais térmicas e escórias de alto forno, dependendo da sua composição química. Os materiais correctivos são armazenados em silos e as matérias consideradas perigosas, como as cinzas volantes, deverão ser armazenadas e preparadas de acordo com as suas especificações individuais.

Para uma boa qualidade do produto e uma boa operação dos fornos é necessária uma mistura de matérias primas bem dimensionada e homogeneizada, o cru. As matérias primas seleccionadas são dosificadas, num processo controlado por computador, e transportadas do local de armazenagem para os moinhos de cru. Estes são um equipamento importante no que respeita a consumos de energia eléctrica, que irão variar de acordo com o tipo de moinho instalado. Actualmente os tipos de moinhos mais comuns, apresentados em ordem decrescente de

consumo de electricidade, são os moinhos tubulares (em que os materiais são esmagados dentro de um tubo rotativo com bolas de metal), os moinhos de mós verticais (os materiais são esmagados entre uma placa rotativa e 2 a 4 mós que são pressionadas hidraulicamente contra a placa), os moinhos de mós horizontais (os materiais são esmagados dentro de um moinho tubular rotativo que contém um cilindro que é pressionado hidraulicamente contra a superfície interior do tubo) e as prensas de rolos (os materiais são esmagados entre dois rolos em contra-rotação). Este último tipo de moinho consome apenas 65% a 70% da electricidade consumida pelos moinhos tubulares (Ruth, 2000).

A escolha do sistema de moagem irá variar entre diferentes instalações devido a um número de factores. Enquanto o consumo de electricidade, e logo os custos associados, são mais elevados nos moinhos tubulares, os custos de operação e manutenção são inferiores aos de outros tipos de moinhos. Os custos de investimento geralmente são difíceis de comparar porque as restrições específicas a cada local desempenham um papel importante (Ruth, 2000). Outros factores, não relacionados com o custo, que afectam o tipo de moinho escolhido são o conteúdo em humidade das matérias primas e a fineza desejada. Os moinhos verticais podem secar e moer ao mesmo tempo os materiais, sendo por isso mais adequados para materiais com elevado teor de humidade. Por seu lado, as prensas de rolos e os moinhos horizontais podem necessitar de um secador separado. A fineza desejada pode ser obtida pela operação de dois tipos de moinhos em circuito para aproveitar as vantagens de cada sistema. A adição de um segundo moinho em série a um sistema já existente pode também ajudar a aumentar a capacidade de moagem. Outro equipamento utilizado neste estágio é o separador ou classificador, que separa as partículas maiores que têm de regressar à moagem, das partículas que já possuem a dimensão desejada, diminuindo assim a energia gasta na moagem.

Depois de triturado, o cru é seco fazendo uso dos gases de exaustão do forno e transportado para o silo de cru. Neste transporte são utilizados mecanismos pneumáticos e mecânicos. Os transportadores mecânicos exigem um investimento mais elevado mas têm custos de operação muito inferiores aos sistemas de transporte pneumáticos (EIPPCB, 2000). Nos silos, a mistura é novamente homogeneizada para atingir a consistência óptima antes de ser alimentada aos fornos.

2.2.2 Armazenamento e Preparação de Combustíveis

Para se obter o calor necessário ao processo podem ser usados vários tipos de combustíveis. O carvão e o coque de petróleo são actualmente os mais comuns, sendo também utilizados o fuelóleo e o gás natural. As elevadas temperaturas e tempos de residência nos fornos fornecem um elevado potencial de destruição de substâncias orgânicas, o que torna possível a opção por combustíveis alternativos, em particular diferentes tipos de resíduos (pneus, óleos usados, plásticos, solventes e outros). O tipo de combustível usado irá determinar as características dos sistemas de armazenamento, preparação e queima.

De modo a minimizar as perdas de calor, os fornos de cimento são operados com o mínimo excesso de ar possível. Para que tal seja possível, as características do combustível principal deverão permitir uma alimentação uniforme e constante, assim como uma combustão fácil e completa; este é o caso dos combustíveis líquidos, gasosos e pulverizados. Em pontos de alimentação específicos podem ser usados combustíveis mais grosseiros, desde que não ultrapassem 35% do combustível total utilizado (Cembureau, 1999).

Os principais constituintes das cinzas dos combustíveis são compostos de sílica e alumínio, que irão combinar com as matérias primas e tornar-se parte do clínquer. Do mesmo modo, metais que possam ser introduzidos com os combustíveis, líquidos ou sólidos, serão também em grande parte incorporados.

O carvão e coque de petróleo são armazenados de modo semelhante às matérias primas, muitas vezes em armazéns cobertos ou com as infra-estruturas necessárias para os proteger do vento e da chuva. A preparação destes combustíveis é geralmente feita nas instalações da cimenteira recorrendo a moinhos de carvão, onde são triturados até atingir dimensões equivalentes às das matérias primas.

O fuelóleo é armazenado em tanques de aço verticais. O gás natural não é armazenado na cimenteira, sendo fornecido directamente pela rede de distribuição de gás.

Os combustíveis alternativos poderão necessitar de um tratamento específico que tem lugar geralmente fora da cimenteira. Este tratamento é feito por empresas especializadas em instalações específicas para esse objectivo. Já na cimenteira, os combustíveis alternativos deverão ser armazenados de acordo com as suas características específicas.

2.2.3 Queima do Clínquer

A queima do clínquer é a parte do processo mais importante em termos de consumos energéticos, emissões e qualidade do produto (EIPPCB, 2000). O processo de formação do clínquer pode ser dividido em quatro passos:



- secagem e pré-aquecimento (20-900°C): evaporação da água e de outros materiais vestigiais voláteis presentes na matéria prima;
- calcinação (500-900°C): descarbonatação do material calcário com produção de óxido de cálcio (CaO) e libertação de dióxido de carbono (CO₂) gasoso;
- sinterização ou clinquerização (1250-1450°C): reacção entre o óxido de cálcio e as substâncias sílico-aluminosas com a formação de clínquer;
- arrefecimento do clínquer (1400-200°C): final da reacção com os processos de cristalização.

Assim, no processo de queima do clínquer é necessário manter temperaturas do material entre 1400 e 1500°C e temperaturas dos gases de 2000°C. O clínquer tem também de ser queimado sob condições oxidantes, pelo que é necessário um excesso de ar na zona de clinquerização do forno (EIPPCB, 2000).

Desde que o forno rotativo foi introduzido em 1895, tornou-se a parte central da produção de clínquer substituindo os fornos verticais existentes até então. Os primeiros fornos rotativos eram compridos, mas a optimização levou ao aparecimento de tecnologias que vieram permitir que a secagem, aquecimento e calcinação tivessem lugar ainda antes da matéria prima entrar no forno, permitindo assim a redução do tamanho deste último.

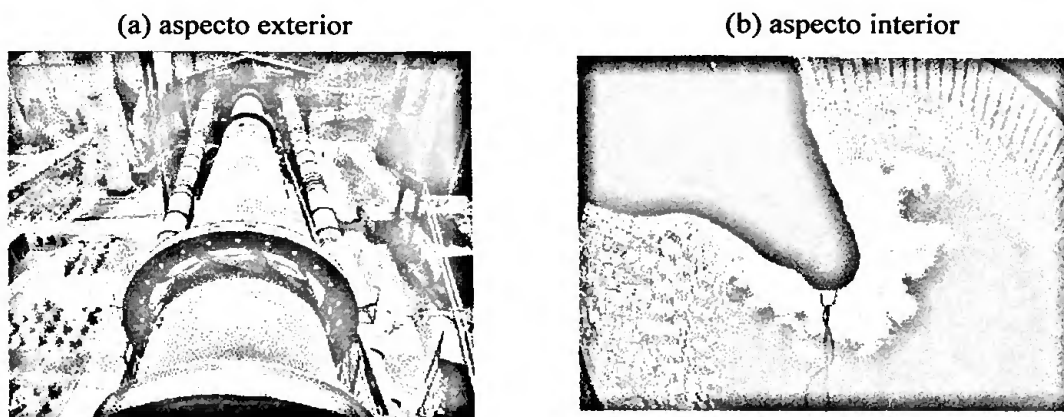
2.2.3.1 Forno rotativo

Os fornos cilíndricos rotativos actualmente existentes possuem uma razão de comprimento para diâmetro que varia entre 10:1 e 38:1, e uma inclinação de 2.5 a 4.5%. O forno é apoiado sobre vários rolamentos e roda a uma velocidade entre 0.5 e 4.5 revoluções por minuto. Para suportar as elevadas temperaturas, todo o forno é revestido com material refractário (EIPPCB, 2000).

A matéria prima é fornecida ao forno pela extremidade mais elevada saindo na extremidade oposta já sob a forma de clínquer. A combinação da inclinação do forno com a sua rotação faz com que o material seja transportado ao longo do forno em contra-corrente com os gases de

aquecimento. O combustível introduzido via queimador principal produz a chama principal com temperaturas à volta dos 2000°C. A Figura 2 mostra um forno rotativo usado para a produção de clínquer.

Figura 2 - Forno rotativo



Fonte: www.flsmidth.com

Fonte: Secil, 2001a

2.2.3.2 Pré-Aquecedores

Para aumentar a eficiência energética e a capacidade de processamento de matéria prima, os sistemas de produção de clínquer podem incorporar um pré-aquecedor; este permite a evaporação de água e o início da calcinação do cru ainda antes da entrada no forno rotativo, reduzindo assim as perdas de calor e aumentando a eficiência energética.

Existem dois tipos de pré-aquecedores: pré-aquecedores de grade e pré-aquecedores de suspensão. Nos pré-aquecedores de grade, surgidos em 1928, o cru é alimentado a uma grade horizontal que circula num túnel fechado; este túnel está dividido em duas câmaras onde se processa o aquecimento e secagem do cru, fazendo uso dos gases de exaustão do forno rotativo. Na Figura 3a podem ver-se os pré-aquecedores de suspensão, cuja invenção nos anos 30 constituiu um desenvolvimento significativo.

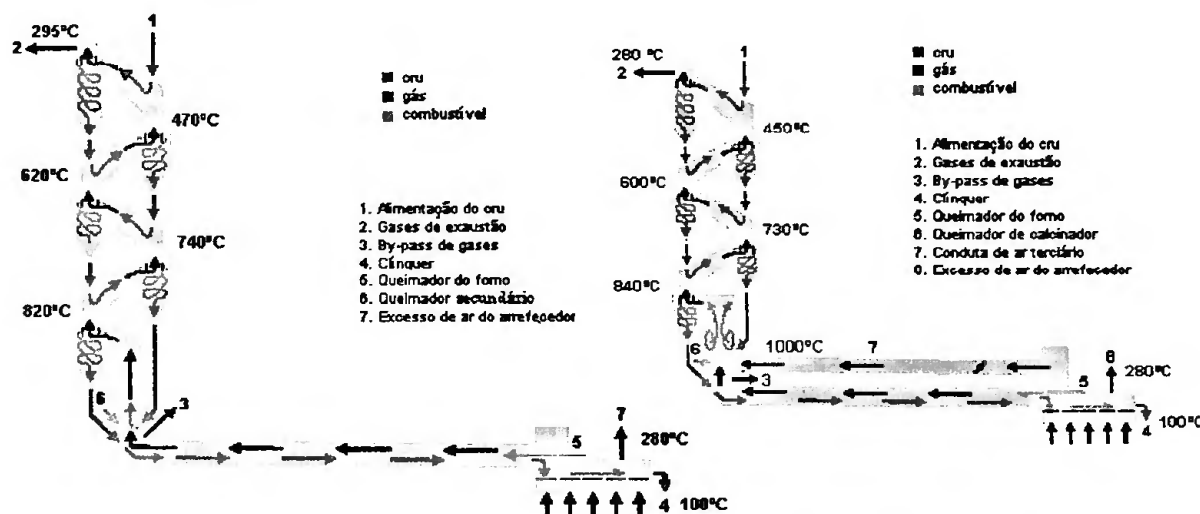
Os pré-aquecedores de suspensão mais comuns são constituídos por uma torre de 4 a 6 ciclones montados em cascata, com uma altura total entre 50 e 120 metros. O cru é adicionado em contra-corrente aos gases de exaustão no segundo estágio mais elevado da cascata, é separado do gás nos ciclones e junta-se a ele antes do estágio seguinte. Este procedimento repete-se em cada estágio até que finalmente o material é descarregado para o forno, onde entra com cerca de

30% da calcinação já efectuada (EIPPCB, 2000). Esta mistura, separação e re-mistura alternadas, facilitam a troca de calor entre os gases e os materiais; os gases entram na base da torre de ciclones a temperaturas acima de 800°C e saem no topo a cerca de 300°C. Por sua vez, o gás de exaustão dos ciclones é usado para a secagem do cru.

Figura 3 - Tipos de sistema de queima

a) Forno com pré-aquecedor de suspensão

b) Forno com pré-aquecedor e pré-calcinador



Adaptada de: www.flsmidth.com

Os pré-aquecedores de 4 estágios são susceptíveis à ocorrência de bloqueios e acumulações causados pela presença excessiva de determinados elementos tais como o enxofre, cloretos e substâncias alcalinas que são facilmente volatilizadas nos fornos. A entrada destas substâncias tem de ser controlada cuidadosamente, podendo ser necessária a instalação de um sistema que separe parte dos gases de modo a que não passem no sistema pré-aquecedor, “by-pass” (Cembureau, 1999).

2.2.3.3 Pré-Calcinadores

O sucesso dos sistemas com pré-aquecedores levou ao aparecimento dos sistemas com pré-calcinadores (ver Figura 3b). O pré-calcinador, situado entre o forno e o pré-aquecedor, utiliza um queimador secundário, que pode queimar até 60% do combustível total, efectuando grande parte da calcinação da matéria prima antes desta entrar no forno.

Nestes sistemas quase 95% da calcinação da matéria prima ocorre antes da entrada no forno, pelo que a instalação de um pré-calcinador num forno já existente permite aumentar a sua capacidade até duas vezes e meia a capacidade actual. Em instalações novas o forno com pré-calcinador terá um tamanho inferior ao de um forno só com pré-aquecedor. Outras vantagens de um sistema de queima com pré-calcinador são o aumento do tempo de vida dos tijolos refractários, devido à menor carga térmica no forno, o que também aumenta o período de funcionamento do forno de 75% para cerca de 90%. A redução das emissões de NOx, devido à queima de parte do combustível no pré-calcinador a temperaturas mais baixas do que na zona de clinquerização do forno é também uma vantagem (www.cement.org.au). Sendo toda a operação do pré-aquecedor sustentada pelos gases provenientes do pré-calcinador, os gases do forno podem ser totalmente desviados para a secagem da matéria prima ou produção de electricidade. Actualmente, sistemas com pré-aquecedores de 5 a 6 estágios e pré-calcinadores são considerados tecnologia standard para novas instalações de produção de clínquer (Cembureau, 1999).

2.2.3.4 Arrefecimento do Clínquer

O processo de arrefecimento do clínquer faz parte integrante do sistema de produção de clínquer e tem uma influência decisiva na sua qualidade. O clínquer sai do forno rotativo a uma temperatura superior a 1400°C e tem de ser arrefecido rapidamente para poder ser manuseado e, principalmente, para manter as suas características químicas e cristalinas. Outro objectivo é a recuperação do máximo calor possível, para reaproveitamento no processo.

O arrefecimento pode ser feito por dois tipos principais de mecanismos: rotativos e de grades. No sistema de arrefecimento por fornos satélites rotativos, 9 a 11 tubos estão dispostos perifericamente ao ponto de descarga do forno de queima. Estes tubos fazem uso do mesmo princípio do forno rotativo para queima do clínquer sendo, no entanto, a troca de calor no sentido inverso, com ar de arrefecimento a ser insuflado através do tubo em contra-corrente com o clínquer. Os fornos satélites não são adequados para fornos rotativos com pré-calcinador, uma vez que não pode ser extraído ar de combustão para a queima secundária no pré-calcinador (Cembureau, 1999).

Os arrefecedores de grades são os mais usados nas instalações modernas. Neste tipo de sistema o arrefecimento do clínquer é conseguido pela passagem de ar através de uma camada de clínquer transportada pelo sistema de grades. Neste sistema, o clínquer cai da parte terminal do forno sobre uma grade onde é deslocado através de um movimento recíproco de pratos que deslizam sobre as grades. Estes pratos têm orifícios de dimensão inferior à do clínquer (0.2-5 cm), por onde é insuflado ar proveniente de compartimentos separados existentes por baixo das grades. A zona de arrefecimento inclui uma “zona de recuperação” e uma “zona de pós-arrefecimento”. A partir da zona de recuperação o ar pré-aquecido é recuperado para a combustão no queimador principal (ar secundário) e para a combustão no pré-calcinador (ar terciário). Este é o sistema de arrefecimento que fornece uma recuperação de calor mais eficiente, mais rápida e mais flexível (Cembureau, 1999).

2.2.4 Moagem e Armazenamento do Cimento

O cimento portland é produzido pela moagem conjunta, num moinho de cimento, de clínquer e gesso, este último numa percentagem até 5%. Os cimentos compostos contêm também outros constituintes tais como escórias, cinzas, pozolana natural ou artificial e pedra calcária. Estas adições minerais podem ser moídas com o clínquer ou separadamente e depois misturadas com o cimento portland.

A moagem do cimento (e também da matéria prima) é uma operação onde o uso de electricidade é elevado e onde a eficiência tem sido relativamente baixa. Essa eficiência tem aumentado graças ao desenvolvimento de novas tecnologias de moagem e separação.

A selecção do sistema de moagem do cimento depende dos tipos de cimento produzido e das características físicas dos componentes, cuja mistura em proporções correctas é essencial para a qualidade do produto e para a eficiência energética do sistema. A fineza e o tamanho das partículas do produto final têm também forte influência na qualidade do cimento. Nesta moagem podem utilizar-se moinhos de mós verticais ou horizontais, moinhos tubulares ou prensas de rolos. Na maior parte das instalações modernas os moinhos funcionam em circuito fechado, sendo as partículas de dimensão superior à pretendida separadas e reenviadas para o moinho de cimento, recorrendo ao uso de separadores (Cembureau, 1999).

Uma inovação recente são os separadores de elevada eficiência ou de terceira geração, que permitem um menor consumo específico de energia, uma eficiência maior e uma maior flexibilidade de ajustamento da fineza do produto (Cembureau, 1999).

Quando se produz apenas um tipo de cimento, o moinho mais usado é o tubular sem separadores, apesar da sua limitação em relação ao teor em humidade da alimentação. O consumo de energia eléctrica dos moinhos tubulares é geralmente elevado quando comparado com outros. Os moinhos de mós verticais são adequados à produção de cimento composto com adições minerais de elevado teor de humidade. As prensas de rolos de alta pressão, usadas principalmente em combinação com os moinhos tubulares dada a necessidade de optimização do tamanho final das partículas, apresentam um menor consumo de energia mas maiores custos de manutenção (EIPPCB, 2000).

O moinho de mós horizontal é o desenvolvimento mais recente nos sistemas de trituração. Consiste numa concha rotativa horizontal com um rolo horizontal que pode ser pressionado hidraulicamente em direcção à concha; o material a triturar passa várias vezes entre o rolo e a concha ao longo do moinho. Ainda existem poucas instalações deste tipo (EIPPCB, 2000).

Os diferentes tipos de cimento deverão ser armazenados separadamente, existindo, no entanto, uma nova geração de silos que permite o armazenamento de mais que um tipo de cimento no mesmo silo. O ar comprimido é usado para iniciar e manter o processo de descarga do cimento dos silos para os tanques ou para as estações de empacotamento.

2.2.5 Controlo do Processo e da Qualidade

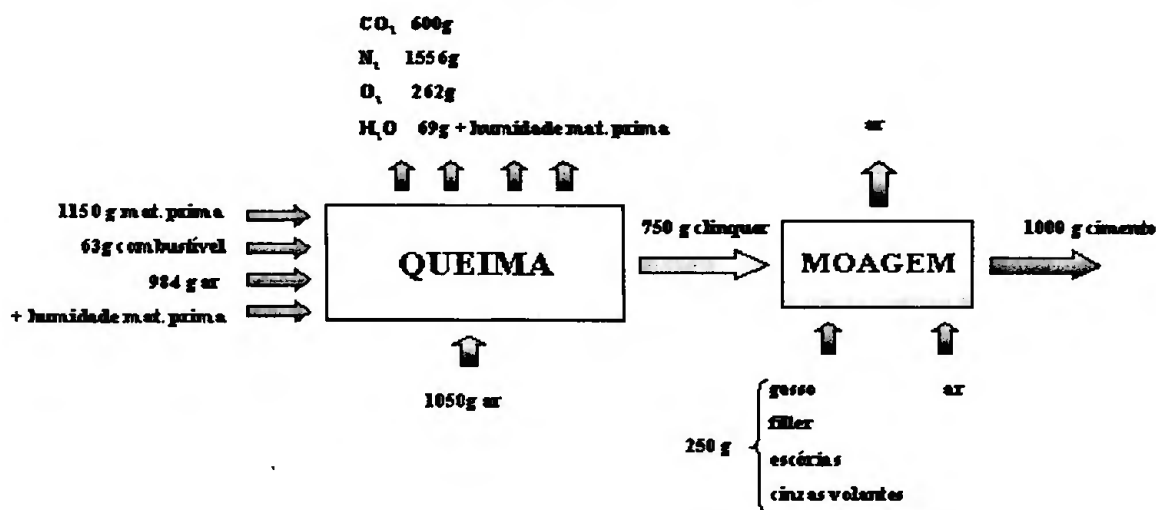
As fábricas de cimento possuem actualmente equipamentos e processos de controlo altamente sofisticados que lhe permitem, a partir de uma sala de comando centralizado, coordenar e controlar todo o processo produtivo, garantindo as especificações dos seus produtos intermédios e finais.

2.3 Principais Aspectos Ambientais

Os principais aspectos ambientais associados à produção do cimento são o consumo de recursos naturais, o consumo de energia, e as emissões gasosas e de partículas. A Figura 4 apresenta o

balanço mássico para a produção de 1 kg de cimento pelo processo de via seca, usando fuelóleo como combustível.

Figura 4 – Balanço mássico para a produção de 1 kg de cimento



Adaptada de: EIPPCB, 2000

Outros aspectos ambientais menos significativos são:

- a descarga de águas residuais, geralmente limitada a escorrências superficiais e água de arrefecimento, não contribuindo substancialmente para a poluição do ambiente aquático;
- ruído e vibrações, associados ao uso de maquinaria pesada e ventiladores de elevada potência;
- maus odores, que raramente constituem problemas numa cimenteira bem gerida, podendo estar principalmente relacionados com emissões resultantes do manuseamento e armazenamento de combustíveis tradicionais ou alternativos.

2.3.1 Consumo de Recursos Naturais

A indústria cimenteira é também uma indústria extractiva uma vez que praticamente todas as matérias primas necessárias são obtidas da crosta terrestre por exploração de minas e pedreiras. Cerca de um terço do peso da pedra calcária é perdido como dióxido de carbono durante o processo de queima, sendo assim necessárias grandes quantidades desta matéria prima. No

Quadro 1 são indicados os consumos médios de matérias primas para a produção de cimento na União Europeia.

Quadro 1 – Consumo médio de matérias primas na produção de cimento na UE

Matérias primas (base seca)	Por tonelada de cimento	Por ano e por Mt clínquer
Calcário, marga e outras	1.27 t	1 568 000 t
Gesso	0.05 t	61 000 t
Adições minerais	0.14 t	172 000 t

Fonte: EIPPCB, 2000

2.3.2 Consumo de Energia

A produção de cimento é uma actividade consumidora intensiva de energia, responsável por cerca de 2% do consumo mundial de energia primária. Nas cimenteiras, a energia é responsável por 30% a 40% dos custos de produção, excluindo os custos com o capital (Cembureau, 1999).

A energia térmica pode ser fornecida por diversos combustíveis e é quase totalmente utilizada no processo de combustão; a electricidade é usada para operar os equipamentos de moagem e transporte e também para operar os fornos. A Figura 5 mostra a repartição do uso de energia por cada uma das fases principais do processo de produção de cimento.

Figura 5 – Uso de energia nos diferentes passos de produção de cimento



Fonte: OCDE, 2000

O estudo do consumo de energia na indústria cimenteira será feito com maior pormenor nos capítulos seguintes deste trabalho.

2.3.3 Emissões

Historicamente, as emissões de partículas, particularmente a partir das chaminés dos fornos, têm sido a maior preocupação ambiental na produção de cimento. Actualmente, a redução e controle

de emissões de poeiras nas cimenteiras modernas requer investimentos elevados e práticas de gestão adequadas, mas já não constitui um problema teórico (Cembureau, 1999).

As emissões de gases dos fornos para a atmosfera são hoje em dia a principal preocupação ambiental da indústria cimenteira. As principais emissões gasosas são os óxidos de azoto (NO_x), o dióxido de enxofre (SO_2), o monóxido de carbono (CO) e o dióxido de carbono (CO_2). São emitidas pequenas quantidades de compostos orgânicos voláteis (COV), amoníaco (NH_3), cloro (Cl) e cloreto de hidrogénio (HCl). Podem também ser emitidos materiais residuais originários do combustível e das matérias primas, como metais pesados, ou produtos de combustão incompleta que são considerados perigosos. Actualmente algumas instalações cimenteiras queimam resíduos como combustível, podendo emitir pequenas quantidades de compostos orgânicos perigosos adicionais (USEPA, 1994).

2.3.3.1 Partículas

As operações que originam emissões de matéria particulada numa instalação de produção de cimento são a aquisição, armazenamento, moagem e mistura de matérias primas, a produção do clínquer, e a moagem, empacotamento e carga do cimento. O sistema de queima, ou seja, a produção de clínquer é a maior fonte de emissão de partículas.

A composição química e o estado físico das partículas dependem do processo de queima, da composição química das matérias primas e do combustível, e do estado do processo. As partículas recolhidas a partir do arrefecedor de clínquer são relativamente grosseiras e a sua presença nos gases de exaustão do arrefecedor depende da distribuição granular e do grau de queima do clínquer, e do caudal de gás de arrefecimento. Estas poeiras abrasivas são apenas minerais de cimento e são recicladas de volta ao processo.

Para capturar as poeiras são usados principalmente dois tipos de equipamentos: os filtros de mangas e os precipitadores electrostáticos. Se as partículas aí recolhidas tiverem ainda uma composição química adequada, é possível reaproveitá-las dentro da própria cimenteira, como aditivos no processo de moagem do cimento, ou no exterior, como fertilizante.

Os pontos de transferência dos transportadores do cru dos locais de armazenamento para a trituração podem originar emissões fugitivas de poeiras. Fazem também parte das fontes difusas

de poeiras, o armazenamento e manuseamento de materiais e o movimento de tráfego em estradas não pavimentadas. No empacotamento e carga do cimento podem também surgir emissões fugitivas de poeiras. Enquanto as emissões das chaminés podem ter impacto na qualidade do ar sobre uma área relativamente vasta, as emissões fugitivas têm impacto a nível local.

2.3.3.2 Óxidos de Azoto (NO_x)

Apesar dos constituintes azotados da matéria prima também terem a sua contribuição para as emissões de óxidos de azoto, estes resultam primariamente da queima do combustível. O monóxido de azoto (NO) é o óxido de azoto predominantemente emitido (cerca de 90%) (EIPPCB, 2000).

Existem dois mecanismos principais de formação de NO_x : o processo térmico e o processo resultante do combustível. O NO_x térmico é uma consequência do processo de combustão, formando-se a temperaturas superiores a 1200°C , e envolve a reacção de azoto molecular presente no ar de combustão com oxigénio no forno, onde o calor é suficiente para que esta reacção se dê. A velocidade da reacção aumenta com a temperatura e com o aumento do conteúdo em oxigénio.

Num pré-calcinador, a temperatura não é suficientemente alta para a formação de NO_x térmico, mas ocorrerá NO_x resultante da oxidação de compostos de azoto presentes no combustível. Além da temperatura e do conteúdo em oxigénio, a formação de NO_x pode ser influenciada pela forma e temperatura da chama, geometria da câmara de combustão, reactividade e conteúdo de azoto no combustível, humidade, tempo de reacção e desenho do queimador (EIPPCB, 2000).

2.3.3.3 Dióxido de enxofre (SO_2)

As matérias primas e o combustível são as fontes de enxofre no processo de queima. O conteúdo em enxofre das matérias primas e do combustível variam de instalação para instalação e com a localização geográfica.

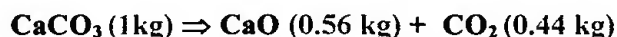
No sistema de queima, devido à natureza básica dos materiais que aí circulam, o SO_2 produzido durante a combustão é removido com bastante eficácia da corrente gasosa. Na zona de

calcinação e pré-calcinação, cerca de 90% do SO₂ libertado na zona de clinquerização é absorvido pelo material em circulação. O SO₂ produzido no pré-aquecedor é parcialmente removido (20 a 70%) nos moinhos de cru, sendo aí capturado pela matéria prima moída. Apesar da maior parte do SO₂ ficar retido no clínquer como sulfato, as emissões de SO₂ a partir de matérias primas com elevado teor de enxofre volátil podem ser significativas. Em média, 39% do SO₂ gerado é removido pelo clínquer, 56% é capturado pelas partículas nos despoeiradores e 5% é emitido para a atmosfera na forma gasosa (CCI, 2000).

2.3.3.4 Dióxido de carbono (CO₂)

As emissões de dióxido de carbono com origem na produção de cimento são resultado da queima do combustível e do processo de calcinação da matéria prima. Tal como outros processos industriais intensivos em energia, a queima de combustível para gerar calor liberta quantidades substanciais de CO₂. As emissões resultantes da queima do combustível são directamente proporcionais à necessidade de calor específico e à relação entre o conteúdo de carbono do combustível e o valor calorífico do combustível, e podem ser reduzidas minimizando o consumo de energia e aumentando a percentagem de aditivos no cimento.

O processo de calcinação das matérias primas é responsável por cerca de 60% das emissões de CO₂ na indústria cimenteira. O dióxido de carbono resulta da decomposição térmica do carbonato de cálcio (CaCO₃):



A percentagem de óxido de cálcio (CaO) no clínquer ronda os 64 - 67%, pelo que as emissões específicas do processo vão depender do rácio clínquer/cimento.

Uma fonte indirecta e menos significativa de CO₂ resulta do consumo de electricidade se considerarmos que esta é produzida em parte a partir de combustíveis fósseis.

2.3.3.5 Outros poluentes

Além das emissões já mencionadas, a queima de combustível nas instalações cimenteiras pode emitir uma vasta gama de poluentes em quantidades menores. Se a reacção de combustão for incompleta, poderão ser emitidos compostos orgânicos voláteis (COV) e monóxido de carbono

(CO). Poderão ocorrer emissões mais significativas de SO₂ e COV em casos em que se efectue um fornecimento de combustível não totalmente controlado e/ou em que haja uma mistura pouco eficaz com o ar comburent, como na queima de pneus inteiros (EIPPCB, 2000).

Nos fornos de cimento, em condições de funcionamento normal, as emissões de COV serão baixas devido ao longo tempo de residência dos gases no forno, à elevada temperatura e ao excesso de ar. As emissões de COVs podem ocorrer nos primeiros passos do processo (pré-aquecedor e pré-calcinador), quando a matéria orgânica presente nas matérias primas é volatilizada no início do aquecimento, a cerca de 400- 600°C (EIPPCB, 2000).

A presença simultânea de cloro e material orgânico pode causar a formação de dioxinas e furanos nos pré-aquecedores e nos equipamentos de controle de poluição do sistema de queima, a temperaturas entre 350°C e 450°C. Devido aos longos tempos de residência no forno e às altas temperaturas, as emissões de dioxinas e furanos são geralmente baixas durante o funcionamento normal e estável dos fornos. No entanto parece ainda existir uma incerteza considerável sobre as emissões destes compostos (EIPPCB, 2000).

Os materiais primários e os combustíveis contêm sempre metais cujo comportamento no processo de queima dependerá da sua volatilidade. Os compostos de metais não voláteis permanecem no processo e saem do forno como parte do clínquer; os compostos de metais voláteis condensam nas partículas de matéria prima a temperaturas mais baixas. A concentração de metais depende da alimentação e da recirculação no sistema. Em particular, o uso de carvão e de resíduos como combustível pode aumentar a entrada de metais no processo (EIPPCB, 2000).

3. CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA MUNDIAL

O cimento é considerado um dos mais importantes materiais de construção em todo o mundo. O seu consumo e produção estão intimamente relacionados com a actividade da construção e, consequentemente, com a actividade económica em geral. Assim, a procura apresenta evoluções diferenciadas em função do desenvolvimento económico e da conjuntura vigente. Nos países desenvolvidos a indústria cimenteira enfrenta a estagnação progressiva da procura, apresentando actualmente um crescimento reduzido. As maiores oportunidades surgem nos mercados dos países emergentes, que apresentam um maior potencial de crescimento.

A globalização tem-se traduzido num aumento rápido da dimensão média das empresas e numa rivalidade cada vez maior no seio da indústria cimenteira, caracterizada essencialmente por uma actuação em múltiplos mercados através da internacionalização das suas actividades por via da diversificação geográfica. Tem-se assim vindo a assistir a um processo de concentração e actualmente o sector já se caracteriza por um pequeno grupo de grandes empresas multinacionais de tecnologia especializada.

A indústria cimenteira é uma indústria intensiva em capital e em energia, exigindo grandes investimentos na construção das instalações e na aquisição e manutenção dos equipamentos, sendo necessário atingir um grau elevado de utilização da capacidade instalada para a obtenção de economias de escala. Os custos de capital representam cerca de 30% dos custos de produção e o longo tempo de vida das cimenteiras é essencial para a sua viabilidade económica. O custo de uma instalação de produção é usualmente superior a 150 milhões de Euros por milhão de tonelada de capacidade anual e os custos de alterações nos processos são muito elevados. A taxa de rentabilidade da indústria cimenteira ronda os 10% (Cembureau, 1999).

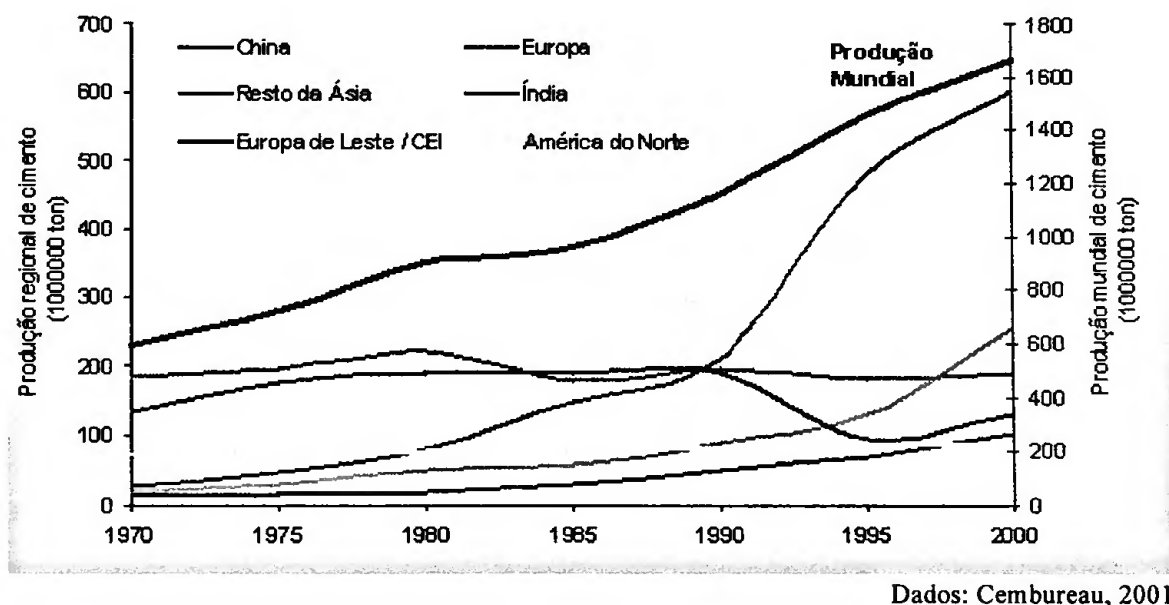
A grande maioria das novas fábricas de cimento em todo o mundo tem incluído as tecnologias mais modernas no seu processo de produção (Ruth, 2000). No entanto, é necessário considerar a modernização de instalações já existentes, uma vez que as fábricas de cimento são um grande investimento de capital e o seu tempo de vida técnico pode ser de várias dezenas de anos, existindo por isso muitas fábricas a operar bastante abaixo do nível de desempenho óptimo.

3.1 Produção e Consumo de Cimento

Devido à sua importância como material de construção e à abundância geográfica das suas matérias primas principais, o cimento é virtualmente produzido em todo o mundo. É um produto de baixo valor acrescentado e consequente reduzido preço unitário, pelo que os custos de transporte adquirem um peso considerável no seu custo final. Assim, a produção destina-se maioritariamente ao mercado interno de cada país, sendo o comércio internacional de cimento limitado quando comparado com a sua produção global.

A Figura 6 mostra a evolução da produção de cimento a nível mundial e regional (notar que a produção mundial está representada no eixo direito da figura, a azul).

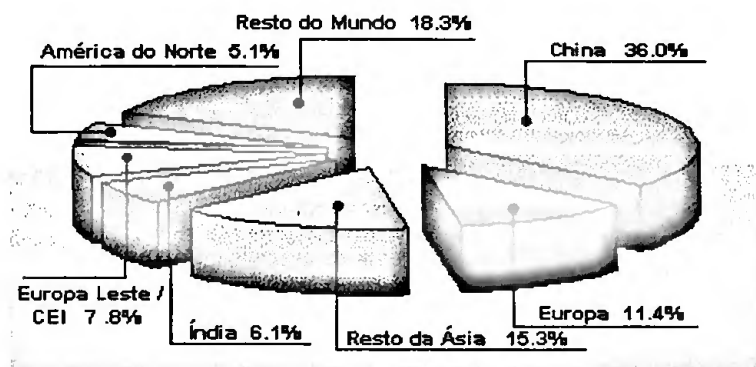
Figura 6 – Evolução da produção mundial de cimento, de 1970 a 2000



Pode observar-se que a produção mundial de cimento tem evoluído positivamente; no entanto, verificam-se duas evoluções diferenciadas: na China, entre 1990 e 2000, a produção de cimento aumentou 65%, totalizando 601 milhões de toneladas no ano 2000; em contraste verifica-se um crescimento muito pequeno na América do Norte, e na Europa uma taxa média de diminuição de 0.1% por ano entre 1970 e 1995, com um ligeiro aumento nos últimos anos. A região da Europa de Leste / CEI verificou a maior queda na produção de cimento, com uma média de diminuição de 1.3% ao ano entre 1970 e 1995.

O menor crescimento nos mercados dos EUA, Europa e Japão está associado às restrições ambientais e ao facto da capacidade instalada ser já suficiente para satisfazer a procura interna. Os investimentos têm sido canalizados para países de mais baixo desenvolvimento com um consequente aumento das empresas multinacionais. Esta tendência manter-se-á nos próximos anos devido à necessidade de infra-estruturas em países como a China e a Índia. De facto, enquanto nos países desenvolvidos os consumos per capita têm vindo a estabilizar ou até diminuir como no caso do Japão, na China verifica-se um rápido aumento e aproximação aos níveis da UE (Nunes, 2001). A Figura 7 apresenta a distribuição mundial da produção de cimento no ano 2000.

Figura 7 – Produção de cimento por região mundial no ano 2000

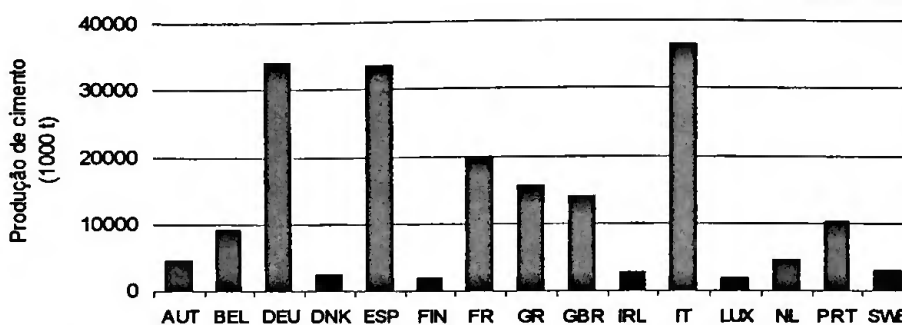


Dados: Cembureau, 2001

Os EUA, a Europa e o Japão foram na década de 90 responsáveis por cerca de 20% da produção mundial de cimento, sendo os restantes 80% pertencentes na sua maioria a países em vias de desenvolvimento, com destaque para a região Asiática. Enquanto em 1973 a indústria cimenteira europeia produzia 27% do cimento mundial, em 2000 foi responsável por apenas cerca de 11% (Cembureau, 2001).

Como se pode ver na Figura 8, na UE os maiores produtores são a Itália, Alemanha e Espanha. Em 1995, a produção na EU era assegurada por 252 instalações com produção de clínquer e cimento e um total de 473 fornos, com uma produção típica de cerca de 3000 toneladas por dia de clínquer, assegurando a via seca 78% do cimento total produzido (Cembureau, 1999).

Figura 8 – Produção de cimento na União Europeia em 1998



Dados: Cembureau, 2001

Enquanto há poucos anos não se verificavam trocas comerciais de cimento, a evolução tecnológica veio facilitar grandemente o transporte por via marítima, nomeadamente as operações de carga e descarga, e a exportação de cimento se tornou mais atractiva cifrando-se actualmente em 6% do mercado (CIMPOR, 2001). No entanto, os custos de transporte continuam a ser significativos e as importações quase sempre são consequência da escassez local temporária de produto e do aparecimento no mercado de cimento a preços concorrenciais, provenientes de países menos desenvolvidos. Os dois principais fornecedores de cimento à UE são a Polónia, pela sua localização junto à Alemanha, e a Turquia através da via marítima. Na UE o principal exportador é a Grécia, que consome apenas 50% da sua produção (Nunes, 2001).

3.2 Consumo de Energia

A indústria cimenteira é responsável por cerca de 2% do consumo mundial de energia primária. É a quarta maior indústria em termos de consumo total de energia (5% do consumo total), logo a seguir às indústrias de ferro e aço, indústria química e refinação de petróleo.

A quantidade de energia utilizada por unidade de produção de cimento, ou intensidade energética depende do tipo de processo usado e das tecnologias usadas nos diferentes estágios da produção, dos combustíveis utilizados, das propriedades químicas e físicas das matérias primas utilizadas e da proporção de clínquer no cimento. Para caracterizar o consumo de energia na indústria cimenteira é importante distinguir entre energia eléctrica e energia térmica. Os maiores consumidores de energia eléctrica no processo de produção de cimento são os moinhos de cru, de cimento e de carvão, e as ventoinhas de grande potência existentes no sistema de

queima e nos moinhos de cimento. O consumo específico de energia eléctrica varia tipicamente entre 90 e 130 kWh por tonelada de cimento (Cembureau, 1999). O Quadro 2 apresenta a distribuição do consumo de electricidade por operação.

Quadro 2 – Distribuição típica do consumo de electricidade por operação numa cimenteira

Operação	% do consumo de electricidade
Moagem do cimento	38%
Moagem do cru	24%
Queima e Arrefecimento	22%
Homogeneização	6%
Empacotamento e Carga	5%
Trituração e Pré-homogeneização	5%

Fonte: www.cement.org.au

O método por via seca tem uma intensidade energética muito inferior ao da via húmida, e tem sofrido várias alterações fundamentalmente ligadas ao modo como o calor é fornecido à matéria prima, ao modo como o clínquer é arrefecido e como a energia térmica nele contida é aproveitada. Estas alterações permitiram uma redução progressiva do consumo específico de energia térmica, como se pode ver no Quadro 3.

Quadro 3 – Consumo específico de combustível para diferentes tipos de sistemas de queima

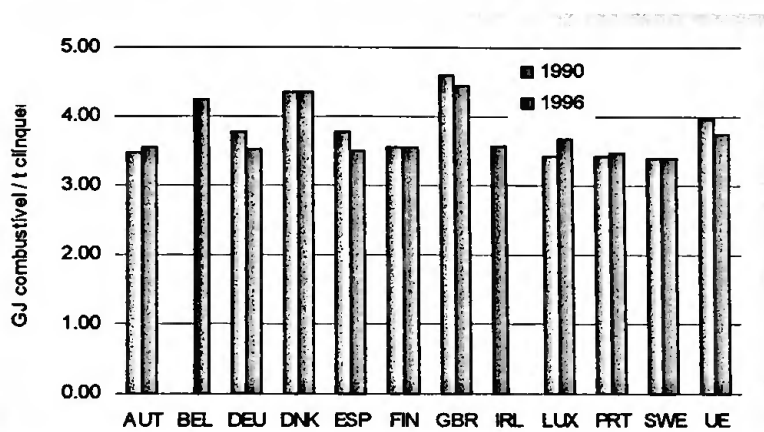
Tipo de forno	Consumo específico de combustível (GJ/t clínquer)
Forno rotativo, via seca, c/ pré-aquecedor de ciclones e pré-calcinador	≈ 3.0
Forno rotativo, via seca, com pré-aquecedor de ciclones	3.1 – 4.2
Forno rotativo, via semi-seca / semi –húmida	3.3 – 4.5
Forno rotativo longo, via-seca	Até 5.0
Forno rotativo longo, via-seca	5.0 – 6.0

Fonte: EIPPCB, 2000

Note-se que no sector cimenteiro, os valores relativos a consumos de energia térmica devem ser estabelecidos em termos de uso de energia por tonelada de clínquer produzido, uma vez que as características do cimento, ou seja, a incorporação de clínquer, podem variar não permitindo depois comparar os desempenhos de diferentes instalações produtoras.

A Figura 9 apresenta o consumo específico de combustível para alguns países da União Europeia. A Dinamarca, um dos menores produtores de cimento da Europa, utiliza apenas o processo húmido, apresentando por isso um dos consumos específicos de combustível mais elevados. O Reino Unido, a Bélgica a França e a Itália têm também alguma produção baseada nesta tecnologia (www.ub.es/medame/indcemen.html). Portugal apresenta um consumo específico de combustível inferior à média da UE, tendo-se, no entanto, verificado um ligeiro aumento de 1990 para 1996.

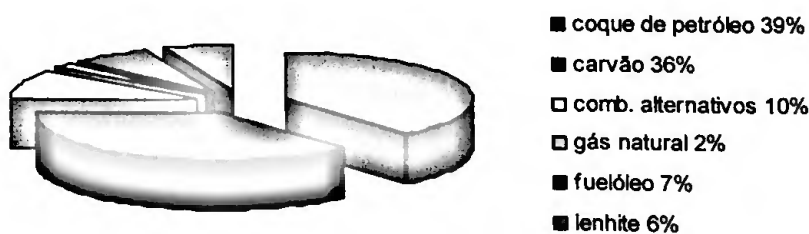
Figura 9 - Consumo específico de combustível em alguns países da UE e média da UE



Dados: De Beer, 2001

Os custos com a energia são uma grande preocupação do sector e as empresas focam a sua atenção na racionalização energética e na procura de combustíveis mais baratos. Os principais combustíveis utilizados na UE são o coque de petróleo e o carvão, como mostra a Figura 10. A França, Dinamarca e Holanda utilizam uma percentagem de carvão inferior à média Europeia; por seu lado, em Portugal o carvão é responsável por quase 90% do combustível utilizado nas cimenteiras (www.ub.es/medame/indcemen.html). O custo elimina geralmente o gás natural, mas a selecção de combustíveis depende da situação local.

Figura 10 – Consumo de combustíveis nas cimenteiras europeias em 1995



Dados: Cembureau, 1999

A indústria cimenteira utiliza também vários tipos de resíduos como combustível. O seu uso varia com a disponibilidade local de resíduos adequados, com a opinião pública e com a legislação em vigor (Cembureau, 1997). Em 1990, os resíduos foram responsáveis por 3 a 5% da energia total consumida nas cimenteiras de UE; em 2000 atingiram os 10-15% (De Beer, 2001).

3.3 Principais Impactes Ambientais

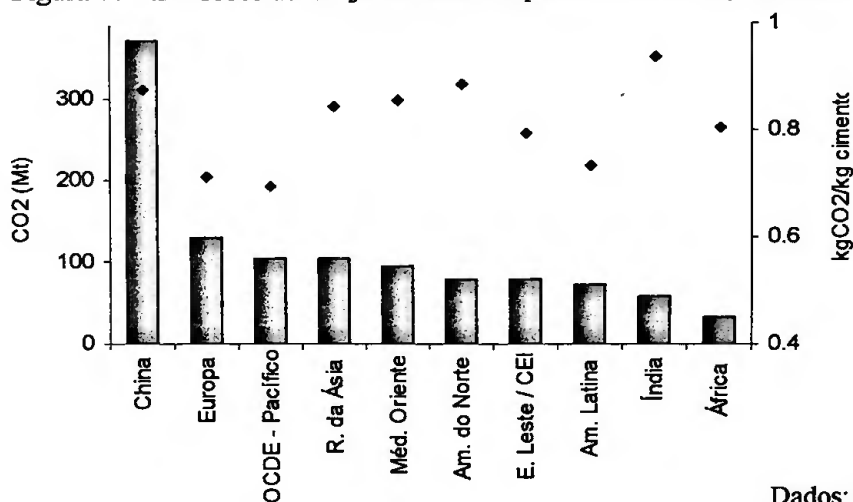
Os principais impactes ambientais resultantes da produção de cimento foram já referidos no capítulo anterior. No Quadro 4 são apresentadas as gamas de emissão de poluentes resultantes da operação dos fornos de clínquer.

Quadro 4 – Gamas de emissão para fornos de clínquer na Europa

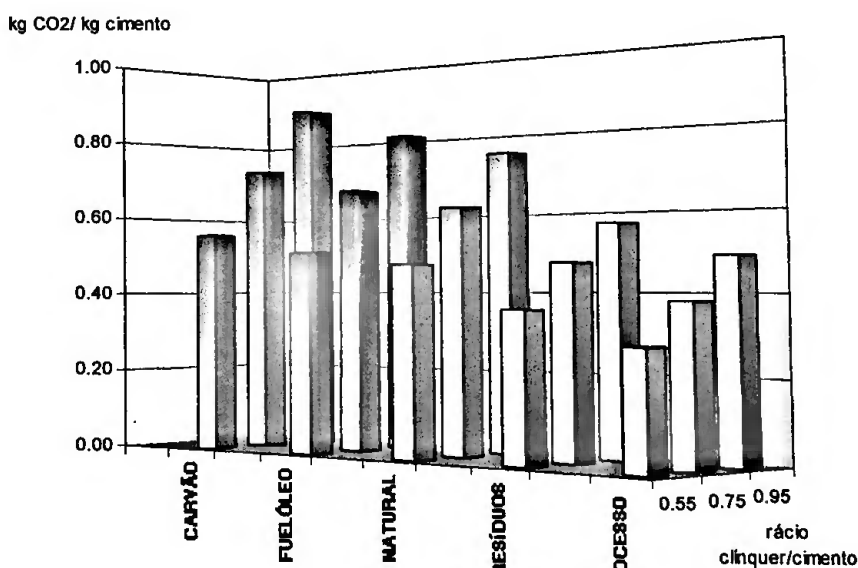
Poluentes	Emissão (mg/Nm ³)	Emissão (kg/t de clínquer)
NOx (como NO ₂)	< 200 – 3000	<0.4 – 6
SO ₂	< 10 – 3500	< 0.02 – 7
Partículas	5 – 200	0.01 – 0.4
CO	500 – 2000	1 – 4
CO ₂	400 – 520 g/Nm ³	800 – 1040
COV	5 – 500	0.01 – 1
HF	< 0.4 – 5	< 0.0008 – 0.01
Cloro	< 1 – 25	< 0.002 – 0.05
Dioxinas/Furanos	< 0.1 – 0.5 ng/Nm ³	< 200 – 1000 ng/ton
Metais (Hg, Cd, Ti)	0.01 - 0.3 (maior parte Hg)	20 – 600 mg/ton

Adaptado de: EIPPCB, 2000

Numa época em que se discutem as alterações climáticas resultantes da emissão de gases com efeito estufa, as emissões de dióxido de carbono assumem bastante protagonismo. A indústria cimenteira mundial é responsável por 5% das emissões globais de dióxido de carbono, distribuídas por diversas regiões. A Figura 11 apresenta estimativas para essas emissões (colunas) e as emissões específicas de CO₂ resultantes da produção de cimento (pontos), isto é, a quantidade de dióxido de carbono emitida por unidade de cimento produzido. O valor médio mundial para este índice é de 0.81 kg CO₂/kg de cimento, apresentando as regiões da Índia, América do Norte e China um valor 10 a 20% superior à média mundial.

Figura 11– Emissões de CO₂ e emissões específicas de CO₂, em 1994

As emissões totais de CO₂ dependem principalmente do tipo de processo de produção, dos vários sub-processos utilizados, do combustível usado (os diferentes tipos de combustível têm diferentes conteúdos de carbono) e do rácio clínquer/cimento (percentagem de aditivos no produto final). A Figura 12 apresenta as estimativas calculadas por Worrel (Worrel, 1999) para as emissões de CO₂ resultantes da produção de cimento pela via seca em relação ao rácio clínquer/cimento e ao tipo de combustível utilizado.

Figura 12 – Emissões de CO₂ por unidade de cimento produzido para o processo seco, para diferentes combustíveis e rácios clínquer/cimento

Verifica-se que quanto menor o rácio clínquer/cimento menor é a intensidade em CO₂ da produção de cimento. O carvão é o combustível que origina maiores emissões devido ao seu elevado teor em carbono; dos combustíveis fósseis, o gás natural é que apresenta menores incidências. É de referir que, no caso dos resíduos, o estudo de Worrel assumiu um factor de emissão de CO₂ de zero e que dependendo da tecnologia de processamento de resíduos alternativa, isto é, com ou sem recuperação de energia, este factor pode ser mais elevado.

4. CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL DA INDÚSTRIA

CIMENTEIRA PORTUGUESA



A indústria cimenteira portuguesa encontra-se hoje no limiar de uma nova era global de eficiência energética. A escassez de recursos energéticos combinada com o custo crescente da energia incentivou a indústria cimenteira a desenvolver e melhorar as técnicas e metodologias numa base contínua. Ao longo dos anos, a indústria cimenteira tem investido significativamente em medidas tecnológicas que a mantenham competitiva num cenário de rápidas alterações a nível mundial. Os aumentos da produtividade atingidos através da adopção de tecnologias mais limpas e eficientes no sector da produção serão eficazes na fusão de objectivos económicos, ambientais e sociais.

4.1 Produtores de Cimento

A indústria cimenteira portuguesa é constituída por dois grandes grupos económicos nacionais: a CIMPOR - Indústria de Cimentos, S.A. e a SECIL - Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.

4.1.1 CIMPOR

A CIMPOR – Cimentos de Portugal, E.P. foi constituída pelo Estado Português em 1976. Em 1991, a empresa tornou-se uma sociedade anónima passando a designar-se por CIMPOR – Cimentos de Portugal, S.A. Um ano mais tarde foi constituída a CMP – Cimentos Maceira e Pataias, que posteriormente foi alienada e adquirida maioritariamente pela SECIL. Teve então início o processo de privatização, com a venda de 20% do capital em 1994 e mais 45% em 1996. Neste mesmo ano foi definida como holding do Grupo a CIMPOR – Cimentos de Portugal, S.G.P.S., S.A. Já em 2001 o Estado Português vendeu a totalidade da sua participação na CIMPOR à Teixeira Duarte, S.A.

A CIMPOR – Indústria de Cimentos, S.A., faz parte integrante do Grupo CIMPOR, como empresa responsável pela produção e comercialização de cimento e cal hidráulica. Esta empresa assegura actualmente cerca de 60% do abastecimento do mercado português, através de 3 centros de produção de cimento - Alhandra, Loulé e Souselas (Figura 13) - com uma capacidade de produção conjunta de 5,8 milhões de toneladas de cimento. A CIMPOR iniciou a sua

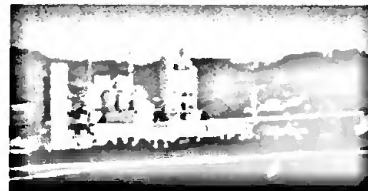
internacionalização em Espanha (1992), alargando-se posteriormente a Moçambique (1994), Marrocos (1996), Brasil (1997), Tunísia (1998) e Egipto (2000).

Figura 13- Centros de Produção da CIMPOR

(a) Alhandra

(b) Loulé

(c) Souselas



Fonte: www.cimpor.pt

4.1.1.1 Centro de Produção de Alhandra

O centro de produção de Alhandra, situado na margem direita do Tejo a 25 quilómetros de Lisboa, remonta a 1890. Por alvará em 1894, foi dada concessão de patente à “Fábrica Tejo”, que seria a primeira fábrica de cimento em Portugal, com uma produção de 6 000 toneladas de cimento por ano. Os dois primeiros fornos rotativos foram instalados em 1931 e em 1934, utilizando o processo de via húmida. Em 1977 passou a ser utilizada a via seca. Actualmente existem duas linhas de produção com uma capacidade conjunta de 2,5 milhões de toneladas de cimento por ano.

Os tipos de cimento produzido são: Tipo I 32,5R, Tipo I 42,5R, Tipo I 52,5R, Tipo II 32,5 e Tipo IV 32,5 segundo a Norma NP 2064. A classificação dos diferentes tipos de cimento será explicada na secção 4.3.1.

4.1.1.2 Centro de Produção de Loulé

O centro de produção de Loulé, situado no centro da região Algarvia a 7 quilómetros de Loulé, iniciou a sua actividade em 1973 com uma capacidade de produção de 350 mil toneladas de cimento por ano. Foi uma das primeiras fábricas em Portugal a produzir clínquer pela via seca, e a primeira a utilizar a técnica de pré-homogeneização na preparação das matérias primas. Actualmente tem uma capacidade de produção anual de 700 mil toneladas de cimento, garantida por um único forno.

Os tipos de cimento produzido são: Tipo I 32,5R, Tipo I 52,5, Tipo II 32,5 e Tipo II 42,5 R segundo a Norma NP 2064.

4.1.1.3 Centro de Produção de Souselas

A 2 de Julho de 1972 iniciaram-se as obras do centro de produção de Souselas, a 10 quilómetros de Coimbra. Em 1974 arrancou a primeira linha de produção, e um ano mais tarde a segunda. Em 1982, motivada pelo crescimento do consumo em Portugal na década de 70, entrou em funcionamento uma terceira linha de produção, com uma capacidade anual de 1 milhão de toneladas por ano. Actualmente, as três linhas têm uma capacidade de produção de 2,6 milhões de toneladas de cimento por ano. Os tipos de cimento produzido são: Tipo I 32,5R, Tipo I 42,5R, Tipo II 32,5 e Tipo II 42,5R segundo a Norma NP 2064.

4.1.2 SECIL

A SECIL teve a sua origem na Companhia de Cimentos de Portugal, fundada em 1904 e instalada junto à foz do rio Sado, em plena Serra da Arrábida. Esta instalação arrancou com dois fornos verticais com uma produção de 10 000 toneladas de cimento por ano. Em 1918 a Companhia Geral da Cal e Cimento adquiriu os terrenos e instalações e arrendou-os à SECIL (Sociedade de Empreendimentos Comerciais e Industriais, Lda). A fusão destas duas sociedades em 1930, logo seguida da participação de duas empresas dinamarquesas, deu lugar à sociedade com a designação actual: SECIL – Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A. Em 1975 a SECIL passa a ser uma empresa privada com maioria de capital público, até que em 1995 se torna uma empresa de capital totalmente privado. Nesta mesma altura a SECIL adquire a CMP tornando-se proprietária das fábricas de cimento da Maceira-Liz e Cibra-Pataias. Actualmente, a holding SEMAPA, (SGPS) S.A. detém a maioria do capital (51.0%), sendo o restante da FLSHH, SGPS, uma holding dinamarquesa. A SEMAPA (SGPS), SA é uma holding cotada na Bolsa de Valores de Lisboa, constituída com o objectivo de gerir a participação maioritária na SECIL.

No ano 2000 a SECIL iniciou a sua actividade fora de Portugal, com a aquisição da Société des Ciments de Gabés na Tunísia, com uma capacidade de produção superior a um milhão de toneladas por ano.

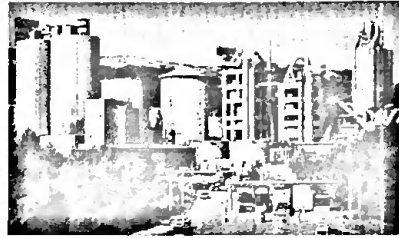
Em Portugal, a SECIL assegura actualmente cerca de 40% da produção nacional de cimento através dos seus 3 centros de produção: Cibra-Pataias, Maceira-Liz e Outão (Figura 14).

Figura 14 - Centros de Produção da SECIL

(a) Cibra-Pataias

(b) Maceira-Liz

(c) Outão



Fonte: Secil, 2000

4.1.2.1 Cibra-Pataias

Em 1944, em Pataias (Alcobaça), numa altura em que as indústrias de mosaico hidráulico eram obrigadas a importar do estrangeiro o cimento branco de que necessitavam, nasce a CIBRA – Companhia Portuguesa de Cimentos Brancos, S.A.R.L. A primeira linha de fabrico de cimento branco iniciou a sua operação em 1950 com um forno rotativo. Em 1961 entrou em funcionamento um segundo forno destinado a produzir cimento Portland. Actualmente a fábrica tem uma capacidade de produção anual instalada de 390 mil toneladas de cimento cinzento e 90 mil toneladas de cimento branco. Os tipos de cimento produzido são: Tipo II 32,5, segundo a Norma NP 2064, e Tipos BR I 42,5 e BR II 32,5 R, segundo a NP 4326.

4.1.2.2 Maceira-Liz

A 3 de Maio de 1923 foi inaugurada oficialmente a fábrica de cimento da Maceira-Liz, na Gândara perto de Leiria, com o acendimento do primeiro forno rotativo para a produção de cimento instalado em Portugal. Cinco anos mais tarde foi instalada uma segunda linha de fabrico, a primeira em Portugal a produzir clínquer pelo processo de via-seca. Entre 1968 e 1970 entraram em funcionamento duas novas linhas de produção, apresentando como inovação os fornos curtos com torres de pré-aquecimento. A primeira prensa de rolos para a moagem de clínquer, actualmente considerada pela bibliografia consultada (Cembureau, 1999, Ruth, 2000 e EIPPCB, 2000) a melhor técnica disponível para o efeito, foi aqui instalada. Como combustível, além do carvão e do coque de petróleo, são também queimados pneus usados. Actualmente a fábrica apresenta uma produção anual de mais de um milhão de toneladas de diferentes tipos de cimento: Tipo I 42,5R, Tipo I 52,5R, Tipo II 32,5 e Tipo IV 32,5 segundo a Norma NP 2064.

4.1.2.3 Secil-Outão

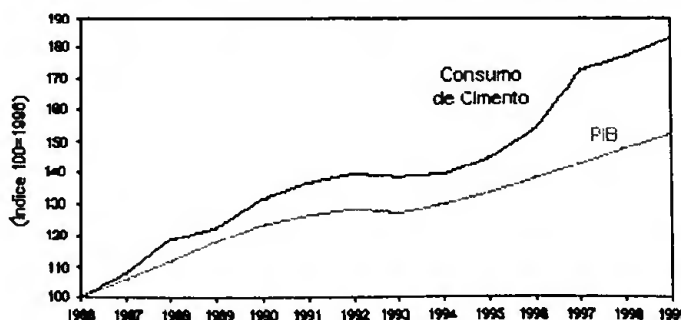
A fábrica da SECIL no Outão teve o seu primeiro forno rotativo para a produção de cimento em 1931, seguindo-se mais 6 fornos todos a operar pelo processo de via húmida. No início da década de 70, os fornos eram responsáveis por uma produção diária de 1000 toneladas de cimento Portland. Em 1978 e 1984 arrancavam respectivamente, o oitavo e nono fornos, que asseguram actualmente a produção total da fábrica, com uma capacidade de produção superior a 2 milhões de toneladas por ano de vários tipos de cimento: Tipo I 32,5R, Tipo I 42,5R, Tipo II 32,5 e Tipo IV 32,5 segundo a Norma NP 2064. A Secil-Outão obteve no final de 1999 a Certificação Ambiental pela Norma ISO 14 001, tendo sido a primeira cimenteira portuguesa a obter este certificado.

4.2 Consumo de Cimento

Em Portugal, o consumo de cimento atingiu no ano 2000, o seu valor mais elevado de sempre, ultrapassando os 11 milhões de toneladas. Também em 2000, as vendas de cimento nacional no mercado português registaram um acréscimo de 3% em relação a 1999, graças ao ainda significativo dinamismo do segmento da construção. Quanto ao preço do cimento, ao longo dos últimos 5 anos verificou-se uma descida em termos reais de 6.2%, mantendo-se a sua influência na inflação nacional na ordem dos 0.006% (Cimpor, 2001).

O consumo nacional de cimento é influenciado por vários factores dos quais se destacam o grau de desenvolvimento do país, que se traduz no consumo de cimento per capita nacional, e a conjuntura económica, que se reflecte no sector da construção. Entre 1986 e 1999 o consumo de cimento verificou um crescimento médio anual de 5%. Este crescimento foi superior ao crescimento do PIB nacional (3.3% ao ano no mesmo período), com se pode ver na Figura 15.

Figura 15 – Evolução do consumo de cimento e do PIB

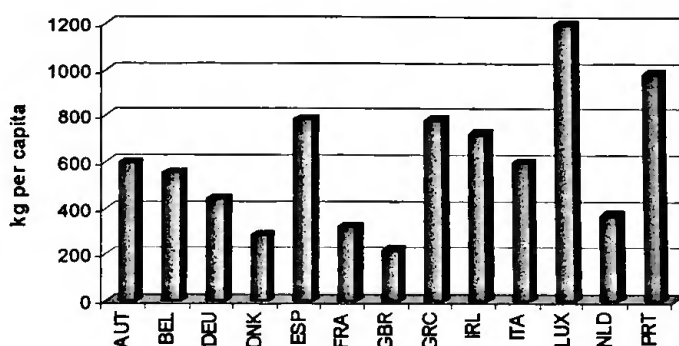


Adaptada de: Nunes, 2001

Em 1993, em virtude da crise económica, o PIB teve uma quebra de 1,4% que se reflectiu no consumo de cimento, que verificou uma diminuição de 1% (Nunes, 2001). A partir de 1994 o consumo foi impulsionado por grandes projectos públicos como a Expo 98 e a Ponte Vasco da Gama, e perspectiva-se que tal continuará por mais alguns anos com a prossecução de novos projectos como o Euro 2004, Metropolitano do Porto e outros.

Como se pode ver na Figura 16, Portugal continua a apresentar um dos consumos per capita mais elevados da Europa (986 kg), apenas ultrapassado pelo Luxemburgo; este facto resulta da ainda necessidade de investimento em infra-estruturas de obras públicas e habitação.

Figura 16 – Consumo de cimento per capita em alguns países da UE, em 1998



Dados: Secil, 2001

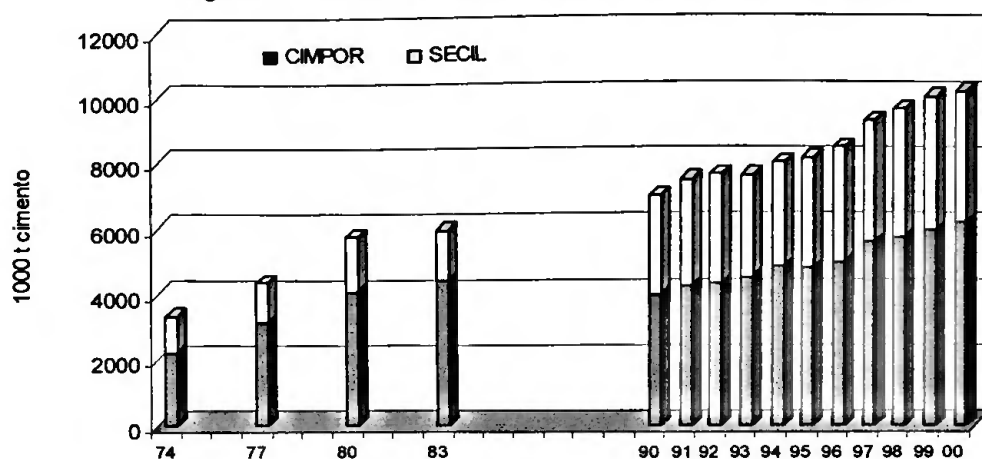
Num futuro relativamente breve o país irá atingir um desenvolvimento razoável das suas infra-estruturas podendo registar-se uma diminuição do consumo per capita para valores mais próximos da média da UE (Nunes, 2001).

4.3 Produção de Cimento

A produção nacional é assegurada por dois grandes grupos cimenteiros, a CIMPOR e a SECIL. A Figura 17 apresenta a evolução da produção de cimento em Portugal nos últimos 25 anos e a contribuição de cada grupo cimenteiro.

A produção de cimento em Portugal tem seguido uma tendência de crescimento (duplicou em 25 anos) que parece nos últimos 4 anos querer estabilizar. De 1990 a 2000 verificou-se um aumento de cerca de 45%, tendo o maior salto ocorrido em 1997 (9,7 %). Actualmente a produção de cimento atingiu já os 10 milhões de toneladas anuais. A CIMPOR viu o seu peso na produção nacional diminuir em virtude da venda das cimenteiras de Maceira e Pataias à SECIL, continuando no entanto a ser responsável por 60% da produção nacional.

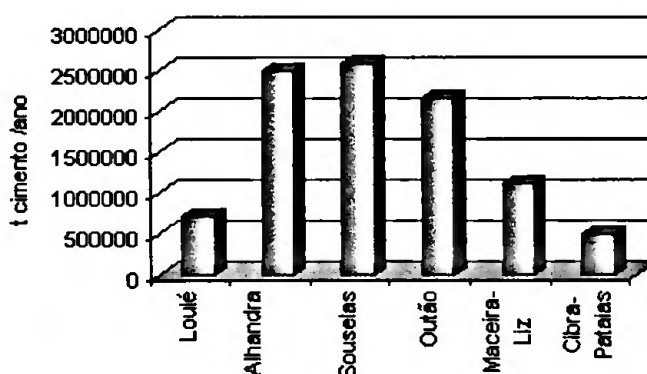
Figura 17 – Evolução da produção de cimento em Portugal



Dados fornecidos por Cimpor e Secil

Actualmente, as capacidades de produção por instalação cimenteira variam entre cerca de meio milhão de toneladas por ano (Cibra-Pataias) e os 2,6 milhões (Souselas), como se pode ver na Figura 18.

Figura 18 – Capacidades de produção instaladas por fábrica

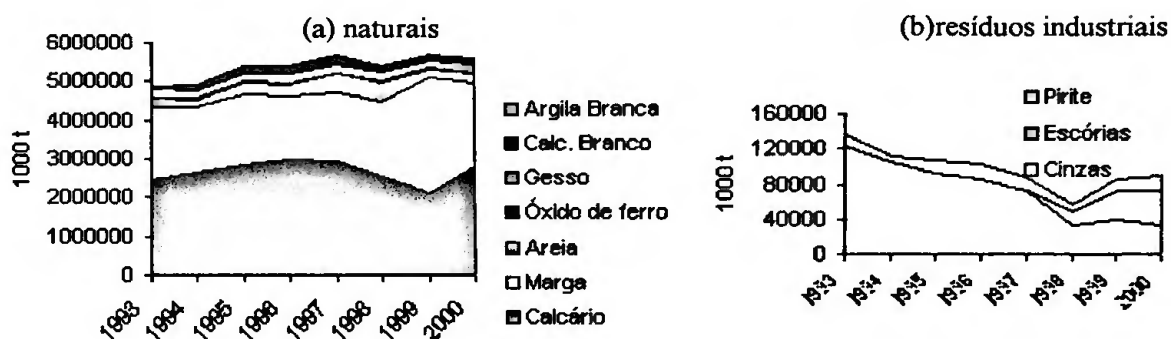


Dados fornecidos por Cimpor e Secil

O consumo de matérias primas é outro factor importante no processo produtivo. As tendências de produção de clínquer e de cimento, e de consumo de matérias primas têm sido semelhantes, tendo todas as categorias experimentado um crescimento gradual nos últimos anos. A Figura 19 mostra a evolução o consumo de matérias primas naturais e de resíduos de outras indústrias nos últimos 10 anos, no Grupo Secil. É possível verificar que o calcário e a marga são as matérias primas principais, com predominância para o calcário, à excepção de 1999 em que se verificou uma nítida substituição de parte do calcário pela marga. Os restantes materiais podem assim ser considerados correctivos, utilizados para ajustar a composição química desejada. Os resíduos

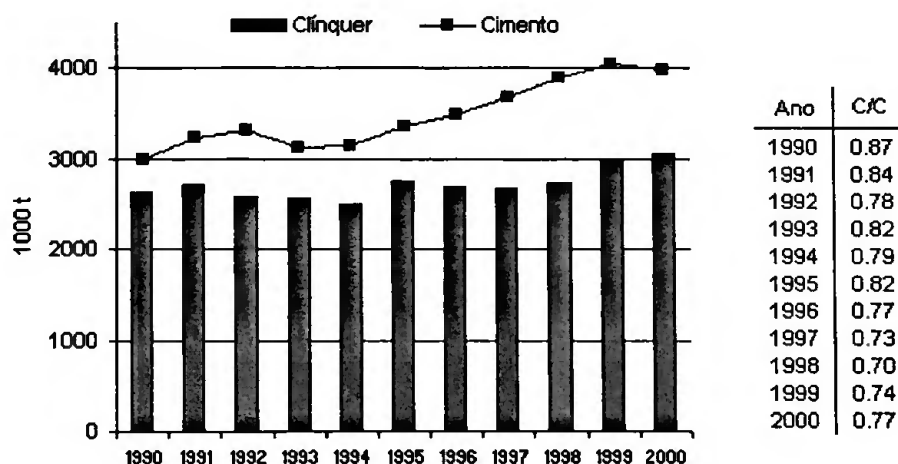
provenientes de outras indústrias são também incorporados como matérias primas mas em muito menor quantidade (duas ordens de grandeza de diferença).

Figura 19 – Evolução do consumo de matérias primas no Grupo Secil



A Figura 20 mostra a evolução da produção de cimento e de clínquer, e também o rácio clínquer/cimento nos últimos 10 anos, no Grupo Secil.

Figura 20 – Evolução da produção, e do rácio clínquer/cimento no Grupo Secil



Dados fornecidos pela Secil

Pode verificar-se que a produção de cimento cresceu mais rapidamente (média de 1.5% ao ano) que a produção de clínquer (média de 0.3% ao ano) entre 1990 e 2000, o que se traduziu na diminuição do rácio clínquer/cimento. No entanto, o rácio calculado poderá não ser real devido às importações de clínquer não contabilizadas. Em 1990, em média, o cimento produzido incorporava 87% de clínquer enquanto no ano 2000 o valor diminuiu para 77%.

4.3.1 Tipos de Cimento Produzidos

Actualmente a classificação dos diferentes tipos de cimento, estabelecida pela norma portuguesa NP 2064, faz-se essencialmente por duas características: o tipo e a classe de resistência.

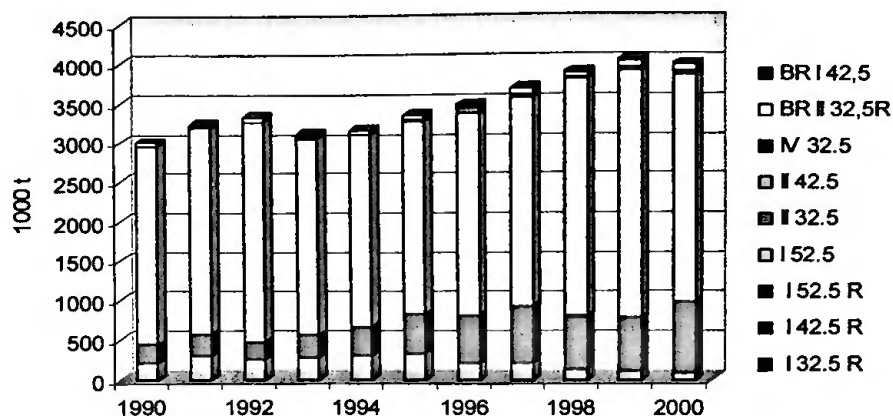
Os cimentos do tipo I incorporam uma percentagem de clínquer Portland superior a 95%. Nos restantes tipos de cimento (II, III e IV) uma parte do clínquer é substituído por produtos industriais secundários (cinzas volantes resultantes da queima de carvão, escórias de alto forno e outros), materiais pozolânicos ou filler calcário. Quanto à classe de resistência, um cimento pode ser classificado como sendo das classes 32,5, 42,5 ou 52,5, dependendo da sua resistência de referência à compressão aos 28 dias. O cimento pode ainda ser classificado pela sua elevada resistência inicial, adicionando um “R” à classificação anterior, se obtiver uma dada resistência mínima à compressão aos 2 dias. Em Portugal, produzem-se cimentos dos tipos I, II, e IV nas diversas classes de resistência.

Cada vez mais as cimenteiras têm vindo a diversificar e diferenciar os seus produtos como meio de resposta às crescentes exigências do mercado e às solicitações específicas dos seus clientes. Em 2000 foi adoptado o “European Cement Standard”, a primeira norma europeia que uniformiza as características dos cimentos produzidos. Aí são cobertos 27 tipos de cimento com diferentes composições, representando mais de 95% do cimento produzido na Europa, classificados em três classes de resistência (Cembureau, 2001). Acompanhando esta evolução, entrará em vigor em 2001 em Portugal a norma portuguesa NP 197 que alarga a gama de cimentos certificados.

A Figura 21 mostra a evolução da produção dos diferentes tipos de cimento em Portugal. A produção de cimentos do tipo II (com menor incorporação de clínquer do que os cimentos do tipo I) é predominante, sendo o cimento II 32,5 o mais produzido nos dois grupos cimenteiros nacionais. No Grupo SECIL é de salientar o aumento da produção de cimento do tipo I 42,5R que passou de 7,6% da produção total em 1990 para 22% no ano 2000. Este facto provocou um aumento do rácio clínquer/cimento nos últimos anos, como se viu na Figura 20.

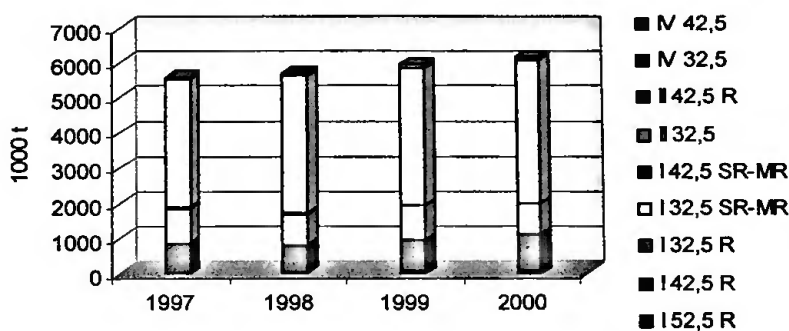
Figura 21 – Evolução da produção dos diferentes tipos de cimento em Portugal

a) Grupo Secil



Dados fornecidos pela Secil

b) Grupo Cimpor

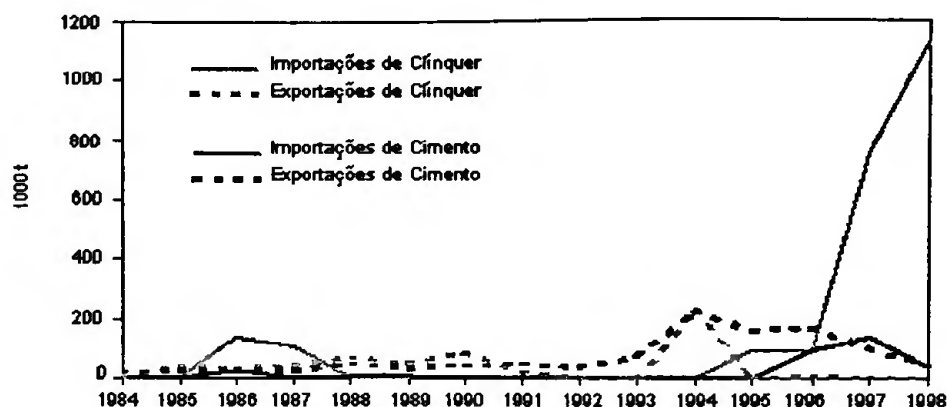


Dados fornecidos pela Cimpor

4.4 Comércio Externo

A procura de cimento no país é quase totalmente satisfeita pela produção nacional, tendo-se no entanto vindo a assistir desde 1996 a um aumento significativo das importações de clínquer, como se pode verificar pela Figura 22. Em 1998 as importações de clínquer verificaram um aumento de quase 50% em relação ao ano anterior, atingindo quase 1,2 milhões de toneladas, o que equivale já a cerca de 15% da capacidade instalada para a produção de clínquer em Portugal (cerca de 8 milhões de toneladas). Este aumento está relacionado com os preços competitivos do clínquer proveniente de países com salários baixos e poucas preocupações ambientais, como a Ucrânia, Estónia e Marrocos. Enquanto as importações de clínquer são feitas pelas empresas produtoras de cimento, as importações de cimento são feitas essencialmente por grandes clientes. As exportações não são significativas, representando apenas cerca de 0.5% da produção nacional (Nunes, 2001).

Figura 22 – Evolução das importações e exportações de clínquer e cimento

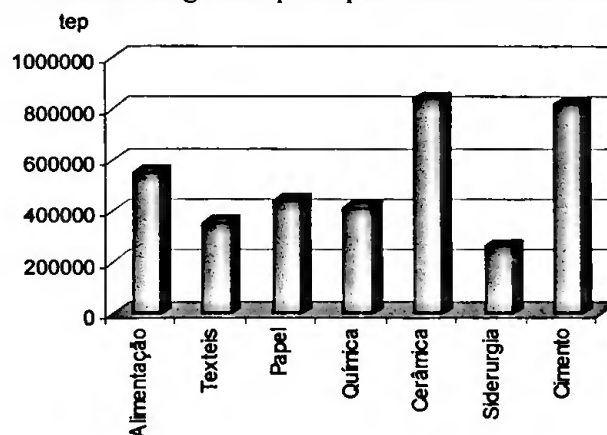


Adaptada de: Nunes , 2001

4.5 Consumo de energia

A indústria cimenteira apresenta-se como um dos sectores que mais energia consome na economia portuguesa. A Figura 23 mostra o consumo de energia para as indústrias mais consumidoras do sector transformador em Portugal, permitindo verificar que a produção de cimento é a segunda maior indústria em termos de consumo absoluto de energia logo a seguir à indústria cerâmica.

Figura 23 – Consumo de energia nas principais indústrias transformadoras em 1998

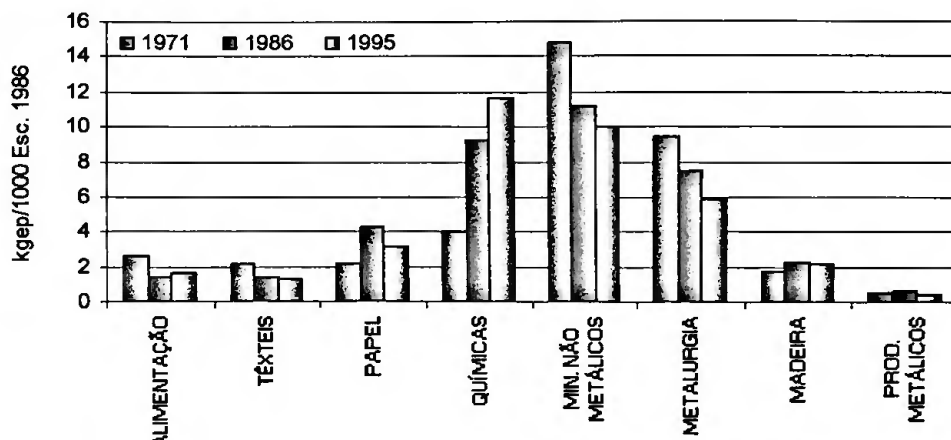


Dados: Balanço Energético Nacional, 1998

A intensidade energética do sector cimenteiro, ou seja, o consumo de energia por unidade de valor acrescentado bruto (VAB) é bastante elevado, mas tem seguido uma tendência decrescente visível na Figura 24 (note-se que a produção de cimento se insere no sector mais vasto dos produtos minerais não metálicos).

A diminuição da intensidade energética do sector cimenteiro pode ser explicada pelo aumento da importação de clínquer e por melhorias tecnológicas verificadas no processo produtivo (Nunes, 2001).

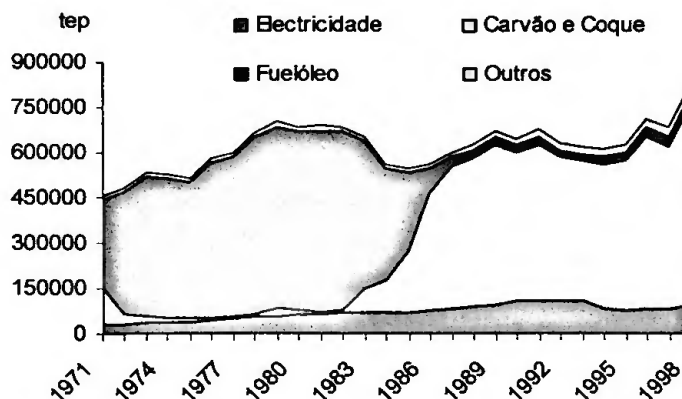
Figura 24 – Intensidade energética nas principais indústrias transformadoras em 1998



Adaptada de: Boucinha, 2001

O consumo total de energia na produção de cimento tem oscilado nos últimos 30 anos seguindo uma tendência crescente que acompanha o aumento da produção de cimento. A Figura 25 mostra a evolução dos consumos de energia na indústria cimenteira.

Figura 25 – Evolução do consumo de energia na indústria cimenteira



Dados: Balanços Energéticos Nacionais, 1971 a 1998

Em 1984 verificou-se uma redução significativa do consumo de energia (cerca de 15%) em relação ao ano anterior, marcando o final da transição da produção de clínquer por via húmida para a via seca. Em 1996 e 1998 verificaram-se dois picos de consumo com aumentos em relação ao ano anterior de 13% e 19,5% respectivamente.

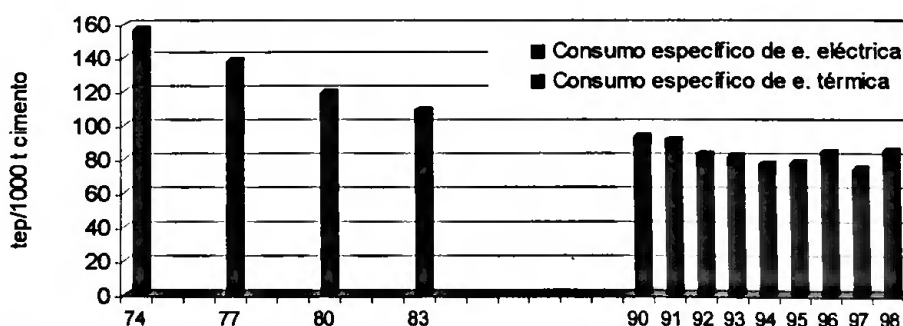
Dadas as características do processo de produção de cimento, nomeadamente as elevadas temperaturas necessárias, a energia térmica é a forma de energia mais consumida, podendo ser fornecida por vários combustíveis. Os combustíveis mais utilizados actualmente são o carvão e o coque de petróleo, este último a adquirir especial importância a partir de 1995, passando em 1998 a ser o combustível principal na indústria cimenteira nacional.

Pode também observar-se na Figura 25 a clara substituição do fuelóleo pelo carvão a partir de 1983. Esta alteração na estrutura do consumo está relacionada com a triplicação do preço do fuelóleo que se verificou entre 1973 e 1984, em consequência dos choques petrolíferos da década de 70. O preço do carvão verificou uma descida acentuada a partir de 1983 o que contribuiu significativamente para que em 1996 a indústria cimenteira portuguesa fosse responsável por 72% do consumo nacional de carvão (Domingos, 2001).

Não vindo indicado na Figura 25, importa referir que a queima de pneus é também uma das formas de energia utilizada pela indústria cimenteira portuguesa. A fábrica da Maceira-Liz iniciou o processo de queima de pneus em 1986 e queimou no ano 2000 cerca de 7,6 milhões de toneladas de pneus, correspondendo a 10-13% da energia total necessária para a produção de clínquer (Secil, 2000).

Importa também verificar a evolução nacional dos consumos específicos de energia, ou seja, a evolução da utilização de energia por unidade de produto fabricado. Não tendo sido possível obter estes dados a nível nacional, procedeu-se ao seu cálculo através dos dados referentes à produção (apresentados na Figura 17) e ao consumo de energia (apresentados na Figura 25). Os cálculos são apresentados no Anexo 1; o resultado é apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Evolução do consumo específico de energia na indústria cimenteira



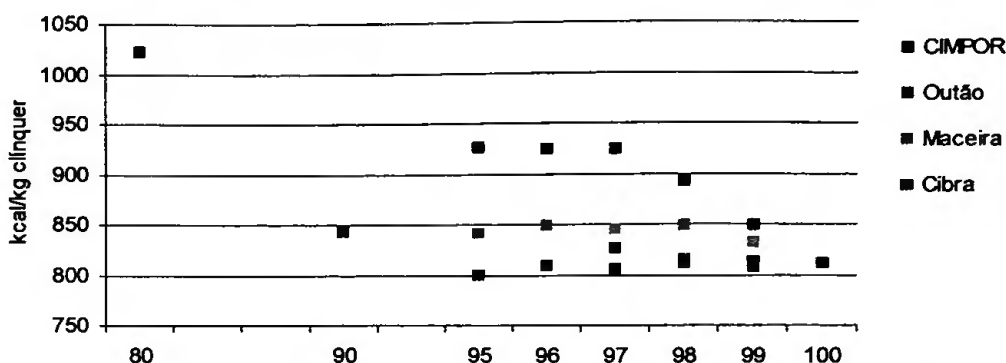
Verifica-se uma tendência decrescente no consumo específico de energia térmica entre 1974 e 1995, com uma diminuição superior a 50% neste período, primeiro em resultado da conversão da produção de via húmida para via seca (até 1983) e depois devido a melhoramentos tecnológicos e às importações de clínquer. Os melhoramentos tecnológicos registados resultaram de investimentos efectuados pelas cimenteiras portuguesas nos sistemas de queima, dos quais se destacam a condução automática das linhas de produção e as alterações introduzidas nas torres de ciclones. Em 1996 e 1998 verificou-se um aumento do consumo específico de energia térmica, possivelmente devido ao aumento de produção de cimentos do tipo I, com maior incorporação de clínquer.

Por seu lado o consumo específico de electricidade sofreu um aumento significativo (29%) entre 1983 e 1990, em resultado da mudança de processo de fabrico. De facto, enquanto no processo de fabrico por via seca o consumo de combustíveis é inferior ao consumo na via húmida, com a electricidade a tendência é inversa, dadas as grandes quantidades de energia eléctrica necessária às operações de pré-homogeneização e preparação do cru (Cembureau, 1999). A partir de 1990 o consumo específico de electricidade verificou uma diminuição significativa em resultado de investimentos efectuados pelas cimenteiras dos quais se destacam: a substituição dos sistemas de transporte pneumático por sistemas mecânicos, a substituição dos moinhos verticais por moinhos horizontais para o cru, a introdução de separadores de alto rendimento nos moinhos de cru e novos ventiladores com pás curvas e sistema de variação da velocidade.

Já foi, no entanto, referido no capítulo anterior que os consumos de energia térmica devem ser estabelecidos em energia por unidade de clínquer produzido e não por unidade de cimento. A Figura 27 apresenta a evolução dos consumos específicos de energia térmica para o clínquer no Grupo Cimpor e nas fábricas da Secil.

Olhando para os dados respeitantes à Cimpor é possível verificar uma diminuição do consumo específico de energia térmica entre 1980 e 1990 de cerca de 18%. Esta diminuição resultou da conversão do processo por via húmida para o processo de via seca. De 1990 até ao ano 2000 registou-se uma diminuição mais discreta, cerca de 4%, em resultado de alterações ao sistema de queima (controlo automatizado, novos queimadores). Note-se que estes dados são a média do grupo Cimpor, não correspondendo a uma instalação cimenteira individualizada.

Figura 27 – Evolução dos consumos específicos de energia térmica por unidade de clínquer



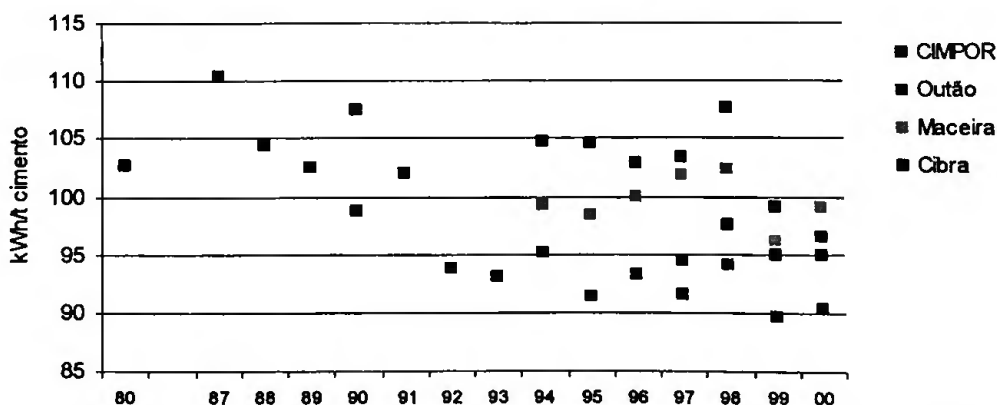
Dados fornecidos por Cimpor e Secil

Olhando para as fábricas da Secil, verifica-se que a instalação de Maceira apresenta uma diminuição do consumo específico de energia térmica de 1998 para 1999, o que terá resultado de modificações e melhoramentos introduzidos nas suas duas linhas de fabrico.

No que respeita à Cibra, são apenas apresentados os consumos relativos à produção de cimento cinzento, pois o cimento branco apresenta consumos bastante superiores dadas as suas características específicas, relacionadas com o seu elevado grau de pureza. O consumo específico verificou uma descida significativa entre 1997 e 1999 resultado de melhorias introduzidas nas linhas de fabrico em 1996 e 1999. A fábrica do Outão apresenta um consumo praticamente estável nos últimos cinco anos, tendo sido realizadas mais cedo o mesmo tipo de alterações introduzidas nas outras instalações.

Na Figura 28 são apresentados os consumos específicos de energia eléctrica no Grupo Cimpor e nas fábricas da Secil.

Figura 28 – Consumos específicos de energia eléctrica



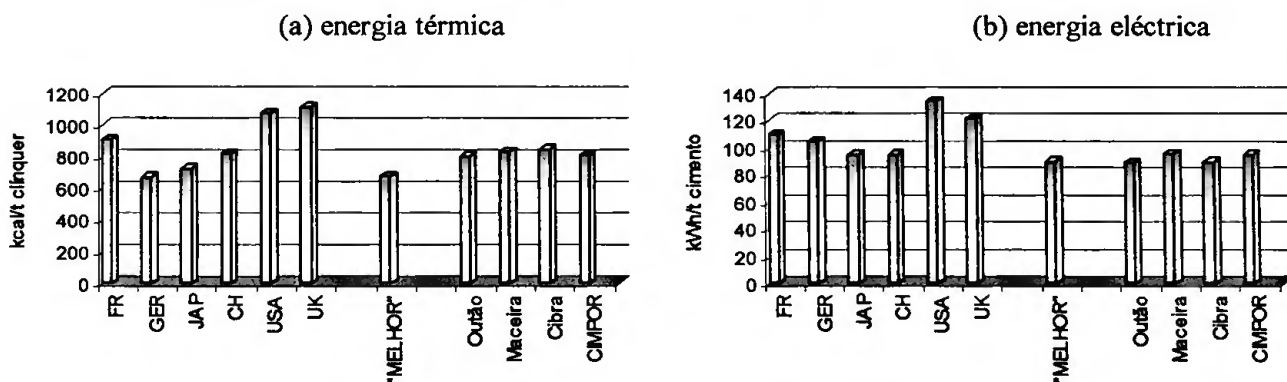
Dados fornecidos por Cimpor e Secil

A evolução da Cimpor e da fábrica do Outão permite verificar uma diminuição significativa do consumo específico de electricidade nos últimos 20 anos. Em 1995 e nos anos que se lhe seguiram os consumos específicos aumentaram para depois voltarem a diminuir em 1999.

A fábrica do Outão apresenta os melhores desempenhos relativos ao consumo específico de electricidade do grupo Secil. Tal resulta da prioridade que foi dada a esta instalação em termos de investimentos, fortemente relacionada com o objectivo de obter a certificação ambiental. Em Maceira há a registar uma subida dos consumos específico no ano 2000 o que poderá ser em parte explicado pelo aumento da produção de cimento com elevado teor de clínquer. A tendência de diminuição do consumo específico de electricidade verificada está relacionada com investimentos realizados já referidos anteriormente.

A Figura 29 dá-nos uma ideia do desempenho energético da indústria cimenteira nacional, quando comparada com a média verificada em alguns países desenvolvidos e a “melhor prática actual”.

Figura 29 – Consumos específicos de energia na indústria cimenteira mundial



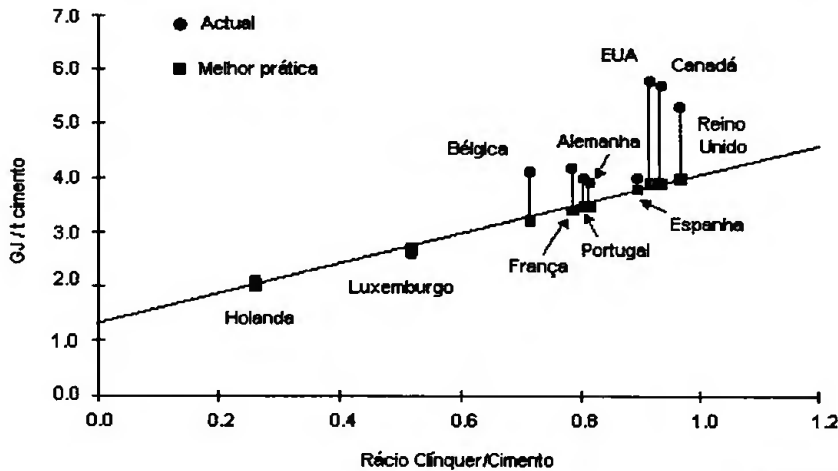
Dados: cleantechindia.com/cti/cement-ch.htm

Uma análise aos gráficos permite verificar nos consumos de energia térmica a existência de algum potencial de melhoria, sendo os consumos cerca de 20% superiores aos da melhor prática actual (680 kcal/t clínquer). Os consumos específicos de energia eléctrica situam-se bastante perto dos consumos da melhor prática actual (90 kWh/t cimento), ou mesmo abaixo desse valor como é o caso do Outão.

No entanto, devido a diferenças de processo e de produto, diferenças de nível de utilização da capacidade e diferentes combustíveis, os dados dos gráficos anteriores podem não ser

directamente comparáveis. Uma comparação deste tipo é apresentada na Figura 30, em que o rácio clínquer/cimento é usado como um indicador da estrutura do sector. A “melhor prática” foi definida com base na instalação cimenteira de Ash Grove Seattle nos EUA. A distância entre o ponto mais alto (consumo específico actual) e o ponto mais baixo (a “melhor prática”) reflecte o potencial técnico para melhoria da eficiência usando a tecnologia disponível.

Figura 30 – Comparação da prática actual e “melhor prática” respeitante a intensidades energéticas para indústrias cimenteiras de vários países (1988)



Adaptada de: Price, 2001

Em 1988 as poupanças potenciais nos EUA eram de 33%, França 21%, Alemanha 9%, Reino Unido 25%, Canadá 33% e Portugal cerca de 12% (Price, 2001). De 1988 até hoje verificaram-se investimentos nas cimenteiras portuguesas no sentido de melhorar a eficiência energética, do mesmo modo a investigação proporcionou novos desenvolvimentos e as tecnologias disponíveis já não são as mesmas de 1988. De qualquer modo, a Figura 30 serve para dar uma ideia do posicionamento da indústria cimenteira portuguesa no contexto internacional em 1988. É ainda de referir que em 1993, o estudo “Energy Technology in the Cement Industrial Sector” encomendado pela DG XVII considerou o sector cimenteiro nacional o segundo melhor da Europa no que respeita ao aproveitamento e gestão de energia (Cimpor, 2001b).

4.6 Impactes Ambientais

Os principais impactes ambientais associados à produção de cimento foram já enunciados no primeiro capítulo deste trabalho. As emissões de partículas, óxidos de azoto, dióxido de enxofre e dióxido de carbono são as que adquirem maior relevo.

4.6.1 Emissões de Partículas

As partículas podem ser emitidas de uma forma difusa - durante as operações de extracção de matérias primas e transporte de matérias primas, combustíveis e produtos intermédios - ou em focos bem localizados - moinhos de carvão, de cru e de clínquer e sistema de queima. Enquanto o primeiro tipo de emissões é difícil de contabilizar, o segundo pode ser determinado através de medição, pontual ou contínua, nos focos de emissão da concentração de partículas.

Um estudo realizado pelo Direcção Geral da Qualidade do Ambiente (DGQA, 1989) determinou um factor de emissão (FE) nacional para 1987 de 0,42 Kg de partículas por tonelada de cimento produzido. Actualmente os dados apresentados no Relatório Ambiental da SECIL (Secil, 2000) permitem calcular FE para os fornos em 1999 de 0.02, 0.04 e 0.05 kg/t cimento para a Secil-Outão, Maceira-Liz e Cibra-Pataias, respectivamente. O Quadro 5 apresenta os cálculos e resultados.

Quadro 5 – Cálculo do factor de emissão para as partículas no grupo Secil

	Outão	Maceira-Liz	Cibra-Pataias
Cimento (t)	2185189	1379206	475771
Partículas (kg)	48000	60000	25000
F.E. (kg part./t cimento)	0.02	0.04	0.05

Esta grande redução verificada no espaço de 10 anos é justificada por melhorias verificadas no processo, de que é exemplo o fecho de circuitos dos moinhos, e também investimentos na área do ambiente. Os investimentos na área do ambiente atingiram no Outão, neste período de 10 anos, um valor de 3,95 milhões de contos (Secil, 2001b); por seu lado a Cimpor investiu nas suas três fábricas, com maior incidência na instalação de Souselas, entre 1997 e 1999 cerca de 3,35 milhões de contos (Cimpor, 2001b). Os principais investimentos na área do controle das poeiras incluíram a substituição ou aumento da capacidade dos filtros electrostáticos, a instalação de filtros de mangas e a cobertura de diversos transportadores.

4.6.2 Emissões de NO_x

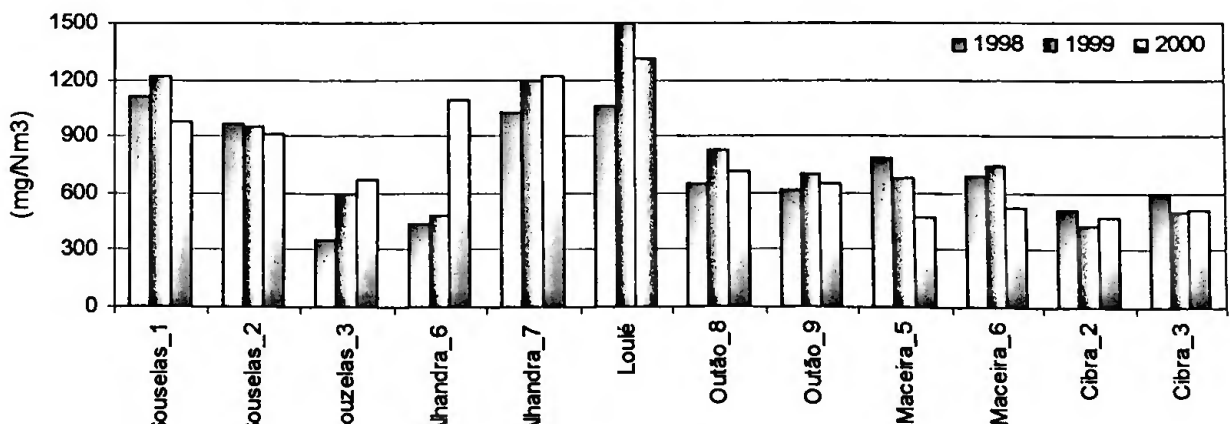
Um estudo realizado pela Direcção Geral da Qualidade do Ambiente (DGQA, 1989) determinou um factor de emissão nacional para 1987 de 1.8 kg de NO_x por tonelada de cimento produzido. Actualmente os dados apresentados no Relatório Ambiental da Secil (Secil, 2000) permitem calcular FE para 1999 de 1.36, 1.10 e 1.05 para a Secil-Outão, Maceira-Liz e Cibra-Pataias, respectivamente, como se pode ver no Quadro 6.

Quadro 6 – Cálculo do factor de emissão para o NO_x no grupo Secil

	Outão	Maceira-Liz	Cibra-Pataias
Cimento (t)	2185189	1379206	475771
NO _x (kg)	2968000	1520000	502000
F.E. (kg part./t cimento)	1.35	1.10	1.05

Esta redução foi conseguida por modificações no processo de produção que passaram pela instalação de queimadores de baixo nível de NO_x. As reduções não foram tão significativas quanto as conseguidas ao nível das partículas, devido ao facto das emissões de NO_x estarem relacionadas com as elevadas temperaturas necessárias ao processo e também com a quantidade de oxigénio. Nas cimenteiras portuguesas estão a efectuar-se ensaios de injeção de amoníaco como meio para reduzir as emissões de NO_x, técnica que será mencionada no capítulo seguinte. O limite actual da legislação portuguesa para a emissão de NO_x em fontes pontuais é de 1300 mg/Nm³. A Figura 31 apresenta os valores emitidos pelas cimenteiras nacionais nos últimos 3 anos. Pode verificar-se que, à excepção da fábrica de Loulé, os fornos têm emitido valores inferiores ao máximo permitido pela legislação.

Figura 31 – Valor médio de emissões de NO_x (mg/Nm³)



Dados fornecidos por Cimpor e Secil

4.6.3 Emissões de SO₂

O dióxido de enxofre não é um gás com efeito de estufa mas a sua presença na atmosfera pode influenciar o clima, dada a sua propensão para reagir com uma variedade de oxidantes produzidos fotoquimicamente para formar aerossóis de sulfato. A concentração deste tipo de partículas está a aumentar devido à queima de combustíveis fósseis que contêm enxofre.

Na contabilização das emissões de SO₂ pela indústria cimenteira devem ter-se em atenção as emissões resultantes do combustível (emissões energéticas) e as resultantes da matéria prima (emissões não relacionadas com os combustíveis).

Foi estimado, a partir de medições feitas em fábricas norueguesas, um factor de emissão não relacionado com os combustíveis de 0.3 kg SO₂/t cimento (IPCC, 1996b). Este factor poderá variar de instalação para instalação com o conteúdo de enxofre nas matérias primas e grau de absorção.

As emissões de SO₂ com origem na matéria prima, podem ser calculadas através da equação seguinte:

$$\text{Emissões}_{\text{SO}_2} (\text{kg}) = \text{FE} \left(\frac{\text{kg SO}_2}{\text{t}_{\text{cimento}}} \right) * \text{PRODUÇÃO}(\text{t}_{\text{cimento}}) \quad [1]$$

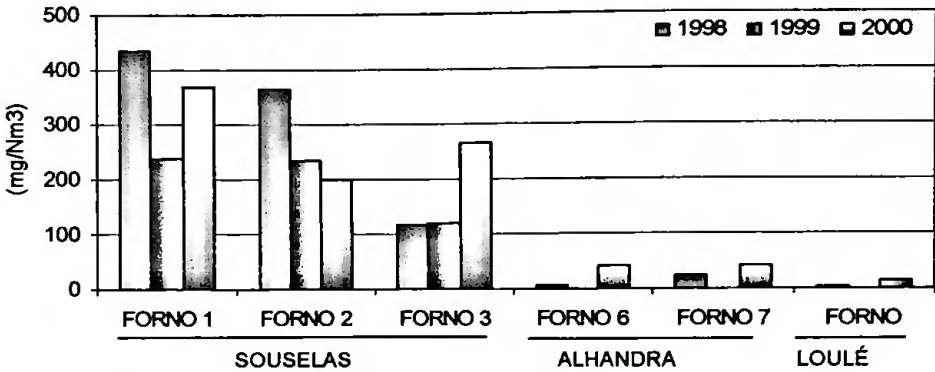
Aplicando a equação anterior e utilizando o factor de emissão proposto pelo IPCC, verifica-se que no ano 2000, as cimenteiras portuguesas libertaram mais de 3 000 toneladas de SO₂ com origem na matéria prima.

As emissões resultantes da queima do combustível dependem do conhecimento de vários factores interrelacionados, incluindo as condições de combustão, tecnologia e características dos combustíveis usados, não sendo por esse motivo possível calculá-las no âmbito deste trabalho.

O limite actual da legislação portuguesa para a emissão de SO₂ em fontes pontuais é de 400 mg/Nm³.

A Figura 32 apresenta os valores emitidos pelo grupo Cimpor nos últimos 3 anos. As emissões em Alhandra e Loulé estão bastante abaixo do limite imposto pela legislação; em Souselas as emissões são mais elevadas tendo mesmo um dos fornos em 1998 ultrapassado o limite de emissão.

Figura 32 – Valor médio de emissões de SO₂ (mg/Nm³) no grupo Cimpor



Dados fornecidos pela Cimpor

4.6.4 Emissões de CO

As emissões de CO estão principalmente relacionadas com a combustão incompleta dos combustíveis. Os dados apresentados no Relatório Ambiental da Secil (Secil, 2000) permitem calcular um factor de emissão para 1999 de 1.38 quilogramas de CO por tonelada de clínquer para a Secil-Outão, como se pode ver no Quadro 7.

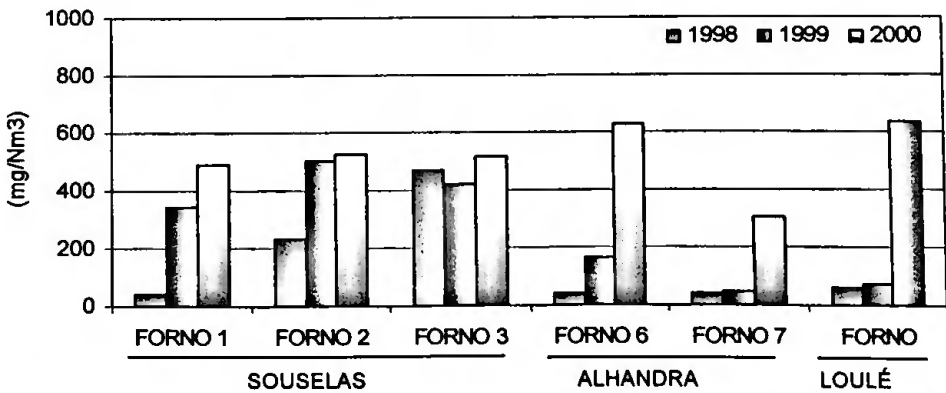
Quadro 7– Cálculo do factor de emissão para o CO na Secil-Outão

Clínquer (t)	CO (kg)	F.E. (kg CO/t clínquer)
1719347	2373000	1.38

Comparando estes valores com os apresentados no Quadro 4 do Capítulo 3, verifica-se que o FE da fábrica do Outão se situa perto do limite inferior da gama apresentada (1 a 4 kg/t).

O limite actual da legislação portuguesa para a emissão de CO a partir de fontes pontuais é de 1000 mg/Nm³. A Figura 33 apresenta os valores emitidos pelo grupo Cimpor nos últimos 3 anos, sempre abaixo do limite legislado.

Figura 33 – Valor médio de emissões de CO (mg/Nm³) no grupo Cimpor



Dados fornecidos pela Cimpor

4.6.5 Emissões de CO₂

A indústria cimenteira, juntamente com a produção de ferro e aço e a produção de vidro, cal e alguns químicos, pertence ao grupo de processos industriais que emitem dióxido de carbono não apenas pela queima de combustíveis mas também pela decomposição das matérias primas carbonatadas. De facto, o processo de produção de cimento representa a fonte mais importante a nível global de CO₂ emitido por processos não associados à queima de combustíveis (IPCC, 1996b).

Um estudo feito pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (DCEA-FCT, 2000) estimou as emissões dos principais gases com efeito de estufa com origem na indústria transformadora portuguesa. A indústria cimenteira foi identificada, a par da indústria química, como o sector transformador que mais CO₂ emite em Portugal. Quanto às emissões de CO₂ por quantidade de energia consumida, o estudo concluiu que a indústria cimenteira possui dos índices mais elevados das indústrias transformadoras, revelando, no entanto, uma tendência decrescente. O mesmo estudo identifica também a indústria cimenteira como sendo o tipo de indústria transformadora com a maior intensidade carbónica, ou seja, com as maiores emissões de CO₂ por unidade de valor acrescentado bruto (VAB), seguido a uma distância considerável pelos sectores cerâmico, vidreiro e da pasta de papel.

4.6.5.1 Cálculo das emissões de CO₂

Já foram mencionadas neste trabalho as três fontes de CO₂ na indústria cimenteira: a queima do combustível, a calcinação da matéria prima e a produção de electricidade (esta última uma fonte indirecta). Não tendo sido possível encontrar na bibliografia consultada, uma estimativa para estas emissões em Portugal procedeu-se ao seu cálculo, com o objectivo de verificar a situação portuguesa no contexto internacional apresentado na Figura 11 do Capítulo 3. Para o cálculo das emissões foi seguida a metodologia proposta pelo IPCC (IPCC, 1996b), que se passa a descrever sumariamente.

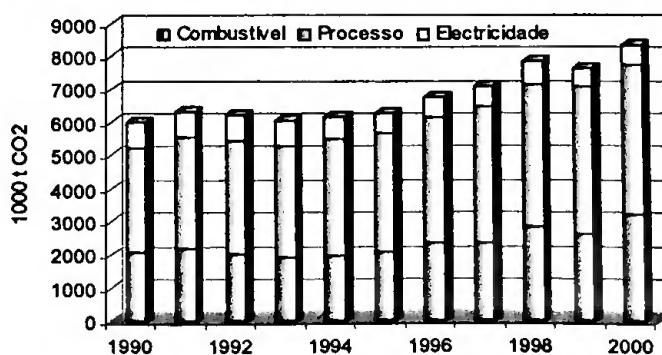
A estimativa das emissões de CO₂ resultantes da calcinação da matéria prima é conseguida através da aplicação de um factor de emissão, em toneladas de CO₂ libertadas por tonelada de cimento produzido, à produção anual de cimento. Assumindo um conteúdo médio de CaO no

cimento de 63.5%, o IPCC propõe o uso de um factor de emissão de 0.4985 toneladas de CO₂ por tonelada de cimento portland produzido. Este valor foi calculado para um conteúdo médio de CaO no cimento portland, cimento que contém cerca de 95% de clínquer; ora, nas cimenteiras nacionais, apenas uma fracção do cimento é portland, sendo o restante portland composto (tipo II) e pozolânico (IV). Estes tipos de cimento contêm uma fracção inferior de clínquer, e logo vão ter menos CaO. Assim, com base nos dados fornecidos pelas cimenteiras nacionais, estimou-se um rácio clínquer/cimento de 0.85, o que resultaria num factor de emissão de 0.446 toneladas de CO₂ por tonelada de cimento produzido, em vez do valor 0.4985 para o cimento portland.

As emissões de CO₂ resultantes da queima de combustíveis são dependentes do conteúdo em carbono do combustível. A estimativa das emissões é obtida aplicando um factor de emissão específico para cada tipo de combustível, em toneladas de carbono (C) por unidade de energia, à quantidade de energia consumida de cada tipo de combustível. O valor obtido é depois multiplicado por um factor de 44/12 (peso molecular do CO₂ / peso molecular do C) para obter as emissões de CO₂. Para o cálculo destas emissões foram usados os factores de emissão propostos pelo IPCC (IPCC, 1996a).

As emissões relacionadas com a energia eléctrica foram calculadas utilizando como factor de emissão 0.1704 toneladas de CO₂ por GJ de electricidade consumido, para o ano de 1997 (MEET Project, 1998). Não possuindo factores de emissão específicos para cada ano, utilizou-se este factor para todos os anos. As emissões de CO₂ obtêm-se multiplicando o factor de emissão pelo consumo de electricidade. Todos os cálculos são apresentados no Anexo 2. Os resultados obtidos para as emissões de CO₂ na última década são apresentados na Figura 34.

Figura 34 – Emissões de CO₂ resultantes da produção nacional de cimento.



De acordo com os cálculos efectuados, as emissões de CO₂ aumentaram entre 1990 e 2000 quase 40%, a um ritmo ligeiramente inferior ao da produção de cimento (45%). As emissões resultantes da calcinação são responsáveis pela maior parte das emissões de CO₂ (entre 52% e 59%), enquanto as emissões indirectas resultantes da produção de electricidade correspondem apenas a 7 a 13% das emissões totais. No ano 2000 as emissões de CO₂ totalizaram 8.3 milhões de toneladas. Importa também calcular as emissões específicas de CO₂, ou seja, o factor de emissão de CO₂ para cada ano. Os resultados são apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 – Cálculo do factor de emissão de CO₂ nas cimenteiras nacionais

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
1000 t CO ₂	5987	6331	6208	6058	6138	6246	6739	7058	7818	7617	8328
kg cimento	6988	7470	7640	7617	7977	8123	8455	9276	9615	9986	10159
FE CO ₂	0.86	0.85	0.81	0.80	0.77	0.77	0.80	0.76	0.81	0.76	0.82

Verifica-se que as emissões específicas de CO₂ têm variado em consequência de oscilações no consumo de combustíveis. Comparando os resultados obtidos para a Europa em 1994 (0.71) com os valores apresentados na Figura 11, no capítulo anterior, verifica-se que o valor obtido é ligeiramente superior. A diferença verificada poderá ser justificada pela inclusão das emissões resultantes do uso da electricidade nos cálculos, emissões essas que não foram contabilizadas no estudo que forneceu os resultados apresentados na Figura 11.

4.6.6 Compromissos Assumidos

Em 1999 foi estabelecido entre os Ministérios da Economia e do Ambiente, e as empresas SECIL, S.A. e CIMPOR, S.A., um Contrato de Melhoria Contínua de Desempenho Ambiental do Sector Cimenteiro, com um período de vigência de 1999 a 2004. Durante este período todas as unidades cimenteiras nacionais se comprometem a obter o registo EMAS (Eco Management Audit System) de acordo com o regulamento Europeu n.º 1836/93. Estão previstas acções e investimentos, entre outros, nos seguintes domínios: melhorias nos processos de desmorte, recuperação paisagística e controlo da emissão difusa de partículas nas pedreiras; construção de um novo parque de pré-homogeneização das matérias primas; montagem de novos filtros nas moagens de cru e de carvão, e nos fornos e arrefecedores de clínquer; armazenagem de combustíveis sólidos em silos; aumento da eficiência energética da moagem de clínquer.

5. MELHORES TÉCNICAS DISPONÍVEIS E I & D

Apesar do maior ímpeto para o desenvolvimento de novas tecnologias ser dado pelas potenciais poupanças de energia e de capital, as novas tecnologias trazem benefícios secundários: fábricas mais modernas, redução das necessidades de manutenção por unidade de produto, possibilidade de uma maior automação e um melhor controlo da qualidade.

O processo de melhoria da eficiência energética na produção de cimento não está ainda completo, mas o que pode ser descrito como melhorias espectaculares está provavelmente a terminar, à medida que se atingem os limites da eficiência térmica. Não há já muito lugar para uma maior especialização das funções do forno e equipamento associado. As alterações irão provavelmente focar-se na melhoria do desempenho de equipamento especializado tal como a eficiência da moagem do cru e do cimento, oportunidades para reduzir o consumo de energia eléctrica, aumento da capacidade de utilização dos sistemas de distribuição e refinamentos na monitorização e controle computadorizados (www.cement.org.au).

Os factores externos que irão ter impacto nos desenvolvimentos tecnológicos serão a legislação ambiental, as políticas relacionadas com os GEE, a redução dos custos com combustíveis através da utilização de combustíveis alternativos e resíduos, a substituição das matérias primas e o uso de produtos secundários de outras indústrias quer na mistura inicial para o cru, quer como substituto de clínquer no produto final.

5.1 Melhores Técnicas Disponíveis para a Produção de Cimento

O processo de produção de cimento e os principais equipamentos disponíveis para cada etapa da produção foram já mencionados no primeiro capítulo deste trabalho. Nesta secção são caracterizados os melhores equipamentos e técnicas disponíveis, no que diz respeito aos consumos de energia.

Falando-se em melhores técnicas disponíveis (BAT, abreviatura inglesa de Best Available Techniques) é importante definir o que se entende por este termo. O Decreto Lei n.º 194/2000, que transpõe para a legislação nacional a Directiva n.º 96/61/CE relativa à Prevenção e Controlo Integrados da Poluição, de que se falará no capítulo seguinte, define BAT como “a fase de

desenvolvimento mais avançada e eficaz das actividades e dos respectivos modos de exploração, que demonstre a aptidão prática de técnicas específicas para constituir, a base dos valores limite de emissão com vista a evitar e, quando tal não seja possível, a reduzir de um modo geral as emissões e o impacte no ambiente no seu todo” (DL n.º 194/2000).

5.1.1 Preparação das Matérias Primas

5.1.1.1 Sistemas de Transporte

Os sistemas de transporte são necessários para transportar material poeirento como o cru, poeiras do forno, clínquer e cimento, através da fábrica. Estes materiais são geralmente transportados por transportadores mecânicos ou pneumáticos; enquanto os primeiros usam menos energia, os segundos têm custos de investimento inferiores.

5.1.1.2 Sistemas de Homogeneização

Para produzir um produto de boa qualidade e manter as condições de combustão óptimas no forno, é crucial que a matéria prima seja uniforme. A maior parte das instalações usa ar comprimido para agitar a mistura, enquanto os processos mais antigos usam sistemas mecânicos. As instalações modernas usam silos de homogeneização por gravidade, poupando assim energia.

5.1.1.3 Sistemas de moagem de cru

Os moinhos para triturar as matérias primas e os separadores, ou classificadores, para separar as partículas trituradas são as duas peças-chave nesta fase do processo. Os principais tipos de moinhos, já mencionados no segundo capítulo são os moinhos tubulares, os moinhos de mós horizontais, os moinhos de mós verticais e as prensas de rolos. A utilização da nova geração de separadores de “alta eficiência” no estágio de preparação das matérias primas, permite poupar 2.8 a 3.8 kWh por tonelada de matéria prima (Ruth, 2000).

O Quadro 9 apresenta o uso de energia para algumas das opções tecnológicas disponíveis para a moagem do cru (os valores apresentados não incluem os sistemas de transporte). Não são

apresentados dados relativos às prensas de rolos porque existem ainda poucas instalações em operação com este sistema de moagem para as matérias primas (Cembureau, 1999).

Quadro 9 - Uso de energia para a preparação de matérias primas

Tecnologia	Uso de energia (kWh/t)
Moinho tubular	17 – 20
Moinho de mós vertical	13 – 14

Fonte: Cembureau, 1999

5.1.2 Produção de Clínquer

O equipamento vital para a produção de clínquer é o forno rotativo. Em todas as instalações cimenteiras modernas, o processo de queima tem início nos pré-aquecedores e pré-calcinadores antes dos materiais entrarem no forno rotativo, o que veio permitir reduzir significativamente as necessidades energéticas da produção de cimento (Cembureau, 1999). Os pré-aquecedores e pré-calcinadores podem ser adicionados a instalações existentes, trazendo além das vantagens energéticas um aumento da capacidade de produção. O Quadro 10 apresenta o uso de energia térmica e de energia eléctrica para as opções tecnológicas disponíveis mais comuns actualmente para a produção de clínquer (os valores apresentados para a energia eléctrica incluem os ventiladores e o movimento mecânico do forno). É de referir que os valores apresentados são típicos para operação normal em instalações de produção com uma capacidade de produção de 3000 t/dia; nas instalações reais os valores apresentados poderão variar numa gama de $\pm 15\%$.

Quadro 10 - Uso de energia para a produção de clínquer

Tecnologia	Uso de e. térmica (MJ/t clínquer)	Uso de electricidade (kWh/t clínquer)
Forno c/ pré-aquecedor de 4 estágios	3150	6.5
Forno c/ pré-aquec. de 4-6 estágios e pré-calcinador	2900 - 3200	6.0

Fonte: Cembureau, 1999

Uma vez deixado o forno, o clínquer tem de ser rapidamente arrefecido. As principais técnicas usadas neste passo são o arrefecedor de grades e o arrefecedor tubular. Todas as fábricas modernas possuem arrefecedores de grades devido à sua grande capacidade e eficiente

recuperação de calor, sendo também este o tipo de arrefecedor necessário para fornecer ar terciário ao pré-calcinador. O Quadro 11 apresenta o uso de energia eléctrica para os arrefecedores de clínquer mais comuns actualmente.

Quadro 11 - Uso de energia eléctrica para o arrefecimento de clínquer

Tecnologia	Energia eléctrica (kWh/t clínquer)
Arrefecedor planetário	1.5
Arrefecedor de grades	4.0 – 8.0

Fonte: Cembureau, 1999

Apesar de um maior uso de energia eléctrica, a eficiente recuperação de calor dos arrefecedores de grades contribui para poupanças energéticas no forno estimadas em cerca de 0.3 GJ/t de cimento (Ruth, 2000).

5.1.3 Moagem do Cimento

Nesta fase final, o clínquer arrefecido é misturado com os aditivos, antes ou depois de moído, para formar o cimento. A energia usada para a moagem do cimento depende do equipamento de moagem, dos materiais adicionados ao clínquer e da fineza desejada do produto final.

A eficiência energética dos moinhos tubulares com corpos moentes, ainda muito usados na moagem final, é relativamente baixa mas actualmente existem vários conceitos novos para a moagem final que podem reduzir significativamente o consumo de energia. Estes conceitos incluem as prensas e moinhos de mós. Os moinhos de mós empregam um misto de compressão e esmagamento; nas prensas de rolos de alta pressão, dois rolos colocam o material sob uma pressão até 3500 bar, aumentando drasticamente a eficiência de moagem. Hoje em dia, as prensas de rolos são muito usadas para expandir a capacidade de sistemas de moagem já existentes, e são encontradas especialmente em países onde a electricidade é cara ou o fornecimento é fraco. Alguns dos novos conceitos de moagem podem levar a uma redução dos custos de operação até 30 a 40% (Martin, 1999).

O Quadro 12 apresenta o uso de energia eléctrica para as opções tecnológicas disponíveis mais comuns para a moagem de clínquer (os valores apresentados não incluem os sistemas de transporte).

Quadro 12 - Uso de energia para a moagem de cimento

Tecnologia	Uso de energia (kWh/t cimento)
Moinho tubular c/ circuito fechado	36.5
Moinho de mós vertical	28.5
Prensas de rolos	24.5
Moinho de mós horizontal	25.5

Fonte: Cembureau, 1999

5.1.4 Medidas Gerais

5.1.4.1 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva envolve o treino do pessoal para a verificação de consumos e eficiência energética. Apesar de muitos processos da produção de cimento serem essencialmente automatizados existem ainda oportunidades de, com treino mínimo, aumentar as poupanças de energia. A manutenção preventiva pode também aumentar a capacidade de utilização da instalação, uma vez que o tempo de paragem dos equipamentos é minorado (Martin, 1999).

5.1.4.2 Motores e Transmissões de Alta Eficiência

Os motores e transmissões mecânicas são usados na fábrica de cimento para movimentar ventiladores de vários equipamentos, rodar o forno, transportar materiais e fazer funcionar os moinhos. Numa instalação cimenteira típica podem ser usados 500 a 700 motores eléctricos, que variam de alguns kW até MW (Martin, 1999). A implementação de melhores estratégias de controle e de motores de alto rendimento pode ajudar a diminuir o consumo de electricidade.

5.1.4.3 Transmissões de Velocidade Variável

Bombas, ventiladores, compressores, transportadores e muitas outras aplicações estão sujeitas a cargas variáveis que podem ocorrer devido a várias razões, previsíveis ou não, tais como variações sazonais ou do processo e variações das taxas de utilização. Existe aí um grande potencial de poupanças que varia entre 20 e 70% do consumo de energia dos equipamentos. Um dos principais métodos para atingir estas poupanças de energia é a aplicação de transmissões de velocidade variável (TVV). As TVV são instrumentos usados para variar a velocidade de

funcionamento dos equipamentos, de modo a que estes correspondam às necessidades do processo. Os benefícios de utilização de TVVs em relação aos métodos convencionais utilizados são a redução do consumo de energia, aumento da produção, custos de manutenção baixos e facilidade de operação (www.energyefficiency-cii.com/energy1.html).

5.2 Melhores Técnicas Disponíveis para o Controle de Emissões

Nesta secção é feita uma caracterização das técnicas disponíveis para o controle das emissões, no que diz respeito a aplicabilidade, potencial de redução e custos de investimento e operação. Para reduzir as emissões do sistema de queima até um determinado nível controlado, estão disponíveis 3 tipos de medidas:

- manutenção do processo existente com redução da entrada no sistema de certos percursos de emissões;
- medidas de redução primárias ou integradas, em que há modificação do processo existente;
- medidas de redução secundárias, em que se mantém o processo e se adiciona uma unidade separada para limpeza dos gases.

O primeiro tipo de medidas, a redução dos percursos de poluentes nas matérias primas e nos combustíveis, pode ser muito eficiente na redução das emissões mas é geralmente impraticável, dada a especificidade das matérias primas disponíveis em cada instalação fabril. Quanto às medidas de redução primárias e secundárias, pode dizer-se que geralmente as primeiras têm custos inferiores mas também eficiências de remoção inferiores (Cembureau, 1999). Comum a todos os tipos de medidas é o facto de nem sempre serem aplicáveis.

É também importante referir que a aplicação destas medidas em instalações já existentes é mais complexa do que para fábricas novas devido à grande variedade de processos e equipamentos em uso, restrições de espaço e natureza das matérias primas. Estes factores podem ter um efeito significativo nos custos de implementação das técnicas de controle de emissões, afectando assim a aplicabilidade da melhor técnica disponível (Cembureau, 1999).

5.2.1 Partículas

Já foi referido que as principais fontes de emissão de partículas na indústria cimenteira são os fornos, os arrefecedores de clínquer e os moinhos. Em cada um destes sub-processos, o ar ou os gases de exaustão do forno passam por material pulverizado, não sendo por isso possível a utilização de métodos de redução primários. As duas técnicas principais usadas para reduzir as emissões de partículas são os filtros de mangas e os precipitadores electrostáticos. Nestes dois tipos de equipamento devido à existência de temperaturas de operação máximas, os gases de exaustão devem ser arrefecidos antes de dirigidos ao despoeirador, o que pode ser conseguido por injeção de água numa torre de condicionamento.

5.2.1.1 Filtros de Mangas

Os filtros de mangas (FM) foram o primeiro equipamento de despoeiramento utilizado na indústria cimenteira. Usam um meio filtrante, os sacos ou mangas, para separar as partículas dos gases de exaustão: enquanto os gases passam através do tecido filtrante dos sacos, as partículas ficam retidas na superfície. A principal vantagem deste equipamento é o facto de a sua eficiência de despoeiramento ser sempre muito elevada mesmo em situações de perturbação do processo (de que são exemplo a paragem e arranque do processo e os picos de CO). Como desvantagem principal conta-se a perda de carga, causada pela obstrução do filtro por partículas, o que provoca um aumento do consumo de electricidade no ventilador. Os sacos têm um tempo de vida limitado e necessitam de ser substituídos periodicamente.

5.2.1.2 Precipitadores Electrostáticos

Os precipitadores electrostáticos (PE) foram desenvolvidos para o uso na produção de cimento nos anos 50 e 60. Usam forças electrostáticas para separar as partículas do gás: eléctrodos de descarga emitem electrões que se fixam nas partículas, que depois de carregadas negativamente se movem em direcção aos eléctrodos colectores, por acção do campo eléctrico existente entre os eléctrodos de descarga e de colecta. A principal vantagem deste tipo de equipamento é a sua reduzida perda de carga e o consequentemente menor consumo de electricidade no ventilador. A desvantagem principal é a redução de eficiência durante perturbações do processo,

nomeadamente durante picos de concentração de CO, em que o funcionamento do PE tem de ser interrompido devido ao risco de explosão.

O custo total de despoeiramento por tonelada de clínquer é geralmente favorável aos PE quando se pretende atingir concentrações na ordem das 30 mg.Nm⁻³; abaixo de 20 mg.Nm⁻³ o custo para os FM é geralmente inferior (Cembureau, 1999).

O Quadro 13 mostra as características destas duas opções de despoeiramento dos gases, tendo como base um forno com pré-aquecedor de suspensão com uma capacidade de produção diária de 3000 toneladas de clínquer. Os custos apresentados incluem todos os componentes: torre de condicionamento, filtro e ventoinha do filtro. No final da caracterização de cada equipamento, é feita a avaliação final no que respeita à consideração de cada equipamento como sendo uma BAT (✓) ou não (X).

Quadro 13 – BATs para controle das emissões de partículas

Tecnologias	Equipamento	Potencial de Redução (%)	Custos			BAT para instalações:	
			Invest. (10 ⁶ Euro)	Operação (Euro/t)	Total (Euro/t)	Existentes	Novas
Precipitador Electrostático	Forno	até 99.99 ⁽¹⁾	2.1-4.6	0.1-0.2	0.4-0.8	✓	✓
	Arrefecedor grades	até 99.99 ⁽²⁾	0.8-1.2	0.09-0.18	0.22-0.38	✓	✓
	Moinho de cimento	até 99.99 ⁽²⁾	0.8-1.2	0.09-0.18	0.22-0.38	✓	X ⁽³⁾
Filtro de mangas	Forno	até 99.99 ⁽¹⁾	2.1- 4.3	0.15-0.35	0.5-0.9	✓	✓
	Arrefecedor grades	até 99.99 ⁽²⁾	1.0-1.4	0.10-0.15	0.26-0.38	✓	✓
	Moinho de cimento	até 99.99	0.3-0.5	0.03-0.04	0.08-0.12	✓	✓

Fonte: Cembureau, 1999

Observações:

⁽¹⁾ A eficiência de redução máxima é atingida para uma concentração de partículas inicial de 500g/Nm³.

⁽²⁾ A eficiência de redução máxima é atingida para uma concentração de partículas inicial de 20g/Nm³.

⁽³⁾ Para moinhos de cimento em instalações novas os PE não são considerados BAT devido às emissões elevadas que ocorrem no início e no fim da operação.

5.2.2 Óxidos de Azoto (NO_x)

Para reduzir as emissões de NO_x resultantes do sistema de queima estão disponíveis medidas primárias e medidas secundárias.

5.2.2.1 Medidas de Redução Primárias

- **Optimização do processo de queima do clínquer**

A optimização do processo de queima do clínquer é feita geralmente para reduzir o consumo de energia, melhorar a qualidade do clínquer e aumentar o tempo de vida dos equipamentos por estabilização dos parâmetros do processo. A redução de NOx é um efeito secundário desta optimização, resultante da redução das temperaturas da chama e de combustão, e da redução do consumo de energia. Como a formação de NOx está directamente relacionada com a queima do combustível, uma redução na quantidade de energia consumida por unidade de clínquer produzido conduzirá a uma diminuição das emissões de NOx por unidade de clínquer.

- **Sistemas computadorizados de controle e monitorização**

Este tipo de sistemas permite a monitorização dos dados de emissões e a manutenção dos parâmetros de operação muito perto dos valores estabelecidos como óptimos, em particular aqueles que são decisivos para a formação de NOx. O excesso de ar é rigorosamente controlado através da monitorização contínua das emissões de O₂ e CO nos gases de exaustão, de modo a manter um nível que promova as condições de combustão óptimas, diminuindo assim as emissões de NOx. A redução do excesso de ar resulta também num aumento de produtividade por unidade de energia consumida, ou seja, numa diminuição do consumo específico de energia, o que indirectamente provoca uma redução de emissões de NOx por unidade de clínquer.

- **Adição de água à chama ou ao combustível do queimador principal**

A adição de água (por exemplo, na forma de água organicamente poluída) ao combustível ou à chama reduz a temperatura e aumenta a concentração dos radicais hidroxilo o que tem um efeito positivo na redução de NOx na zona de queima. No entanto, esta técnica pode causar problemas na operação dos fornos.

- **Queimador de baixo NOx**

A menor formação de NOx nos queimadores de baixo NOx é resultado da formação de uma chama mais uniforme, sem picos de temperatura, e de uma atmosfera interna redutora. Este tipo de queimador usa 5 a 7% de ar primário, e por isso pode apenas ser utilizado em sistemas de queima indirectos. Estes queimadores são projectados de modo a reduzir a turbulência da

chama, adiar a mistura entre combustível e ar, e estabelecer zonas ricas em combustível para a combustão inicial.



- **Combustão multi-estágios em pré-calcinadores**

Esta técnica é levada a cabo em pré-calcinadores especialmente designados para o efeito. O primeiro estágio da combustão tem lugar no forno rotativo sob condições óptimas para o processo de queima do clínquer. No segundo estágio de combustão, o combustível é injectado na zona inicial do forno em contra-corrente com os gases de exaustão. Aí é queimado numa atmosfera de oxigénio sub-estequiométrica para criar uma atmosfera fortemente redutora, que inibe a formação de NOx combustível e elimina uma parte do NOx formado na primeira zona de queima. A seguir a este segundo estágio de combustão, na direcção do escoamento do gás, são adicionados ar terciário e mais combustível para completar a queima.

Este tipo de combustão pode ser aplicado a fornos com pré-calcinador, pois num sistema de pré-aquecedores sem calcinador a sua instalação implica modificações substanciais no processo de fabrico.

A queima de combustível grosseiro, de que os pneus são um exemplo, é uma variante da combustão estagiada, uma vez que é criada uma zona redutora quando esse combustível é queimado. Esta queima tem efeitos positivos na redução de NOx, sendo, no entanto, muito difícil produzir uma atmosfera redutora controlada com a queima de combustível grosseiro.

5.2.2.2 Medidas de Redução Secundárias

- **Redução não-catalítica selectiva**

Nesta técnica, são injectados compostos de amónia nos gases de exaustão para reduzir o NOx a azoto molecular (N_2). A eficiência de redução de NOx depende da temperatura, do tempo de residência e das concentrações de amónia e de NOx. A gama de temperaturas (800-1000°C) é crítica para a condução da reacção: a temperaturas mais elevadas, a velocidade da reacção competitiva, que dá origem à formação de NOx é mais rápida que a de destruição; a temperaturas mais baixas a velocidade da reacção é muito baixa e a amónia não reage.

Como fonte de amónia podem ser usados vários compostos de azoto, incluindo ureia e biosólidos (lamas residuais desidratadas) mas por razões de custo, segurança, simplicidade e formação de produtos secundários, a água de amónia a 25% é a mais usada.

O Quadro 14 mostra as principais características das diferentes possibilidades para reduzir as emissões de NOx com eficiências entre os 0 e os 65%. Cada medida de redução necessita de certas condições prévias antes de ser aplicada. Os dados apresentados têm como base uma instalação com uma produção diária de 3000 toneladas de clínquer, e as eficiências de redução máximas são atingidas para concentrações iniciais de 2000 mgNOx.Nm⁻³.

Quadro 14 – BATs para controle das emissões de NOx

Tecnologias	Potencial de Redução (%)	Custos			BAT para instalações:	
		Invest. (10 ⁶ Euro)	Operação (Euro/t)	Total (Euro/t)	Existentes	Novas
Optimização do processo de queima de clínquer	0 - 20	0 - 5	- 1)	- 1)	√	√
Sistema computadorizado de controle e monitorização	até 30	0.3 - 2.5 2)	< 0.1	0.14-0.51	√	√
Queimador de baixo NOx	0 - 30	0.2-0.35 ³⁾ 0.6-0.8 ⁴⁾	0	0.03-0.19	√	√
Adição de água à chama	até 50	0 - 0.2	0.03- 0.25	0.03- 0.52	√ ⁵⁾	√ ⁵⁾
Combustão multi-estágios	10 - 50	1 - 4	0	0.16-0.65	X ⁶⁾	√
Redução amónia	até 65	0.5 - 1.5	0.3 - 0.5	0.38-0.74	√	√
não-catalítica biosólidos	até 50	0.4 - 0.6	1.9 - 2.7	2.0 - 5.6	X	X
selectiva ureia	até 65	0.5 - 1.0	1.0 - 1.5	1.1 - 1.7	X	X

Fonte: Cembureau, 1999

Observações:

¹⁾ O custo de operação de um forno optimizado é geralmente reduzido quando comparado com um não optimizado. No entanto, não pode ser indicado um custo geral porque a optimização é um processo específico a cada forno.

²⁾ O custo de investimento do sistema será de cerca de 300 mil Euros, no entanto podem ser necessários investimentos adicionais para instalação de equipamentos de medição e doseamento.

³⁾ Custo do novo queimador.

⁴⁾ Se o sistema de queima actual for directo é necessário instalar um sistema de queima indirecto, daí o custo adicional.

⁵⁾ Pode causar problemas na operação do forno.

⁶⁾ Para fornos existentes só é considerada BAT se estes já estiverem equipados com pré-calcinador e arrefecedor de grades.

Hoje é consenso geral de que, com equipamentos e procedimentos sofisticados, na maior parte dos novos fornos com pré-aquecedor e pré-calcinador as emissões de NO_x podem ser mantidas abaixo dos 500 mgNO_x.Nm⁻³ (Cembureau, 1999).

5.2.3 Dióxido de Enxofre (SO₂)

Para reduzir as emissões de SO₂ estão disponíveis várias tipos de medidas descritas a seguir.

5.2.3.1 Medidas de Redução Primárias

- **Optimização do processo de queima do clínquer**

Tal como já se viu para o caso dos óxidos de azoto, a redução das emissões de SO₂ é um efeito secundário da optimização do processo de queima. Esta redução é provocada pela diminuição da volatilização dos compostos de enxofre, devido a temperaturas da chama e de combustão mais baixas, assim como por uma operação mais estável do forno.

- **Adição de cal apagada à alimentação de fornos com pré-aquecedor**

O melhor local para introduzir a cal apagada (Ca(OH)₂) é na alimentação do forno (em vez da sua adição directamente nos gases de exaustão). Já na corrente gasosa a cal reage com o SO₂, formando um composto (CaSO₄) que é incorporado no clínquer. Se se pretender atingir uma concentração final de 400 mgSO₂.Nm⁻³, a concentração inicial de SO₂ nos gases não deverá ultrapassar os 1400 mgSO₂.Nm⁻³. Para concentrações iniciais mais elevadas, a adição de cal apagada deixa de ser económica e ecologicamente viável.

5.2.3.2 Medidas de Redução Secundárias

As medidas secundárias actualmente existentes podem reduzir concentrações iniciais de SO₂ superiores a 1500 mg.Nm⁻³ a valores abaixo dos 500 mg.Nm⁻³, mas nenhuma é ainda economicamente viável.

- **Absorvedor de Leito Fluidizado Circulante (CFBA)**

Este sistema consiste num reactor com um leito fluidizado constituído por uma mistura de cal e de cru. O contacto intenso entre gás e absorvente, os longos tempos de residência e a baixa temperatura permitem a absorção do SO₂.

• Adsorção em Coque Activado, POLVITEC

O POLVITEC é constituído por uma série de leitos de carvão activado sobrepostos. Os gases, já despoeirados, passam no coque activado onde compostos como o SO_2 e o NH_3 são eficientemente adsorvidos. O coque usado é extraído periodicamente e alimentado ao forno juntamente com os outros combustíveis, acabando o SO_2 adsorvido por ser integrado no clínquer.

A informação apresentada no Quadro 15 sintetiza as características das diversas técnicas disponíveis para reduzir as emissões de SO_2 , e tem como base um forno com pré-calcinador com uma produção diária de clínquer de 3000 toneladas e conteúdo de SO_2 nos gases até 3000 mg.Nm^{-3} .

Quadro 15 – BATs para controle das emissões de SO_2

Tecnologias	Potencial de Redução (%)	Custos			BAT para instalações:	
		Invest. (10^6 Euro)	Operação (Euro/t)	Total (Euro/t)	Existentes	Novas
Optimização do processo de queima do clínquer	0 - 50	0 - 5	0	0 - 0.81	√	√
Adição de cal à alimentação do forno	até 65	0.2-0.3	0.1- 0.4	0.13-0.45	√	√
CFBA	até 90	11	1.6	3.4	X ⁽¹⁾	X ⁽¹⁾
POLVITEC	até 95	21	0.9	4.3	X ⁽²⁾	X ⁽²⁾

Fonte: Cembureau, 1999

Observações:

⁽¹⁾ Apenas é considerada BAT no caso das emissões de SO_2 muito elevadas terem de ser reduzidas.

⁽²⁾ Não é considerada BAT porque os custos são muito elevados.

5.2.4 Dióxido de Carbono (CO_2)

As técnicas disponíveis para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa podem ser divididas em duas grandes categorias: as técnicas relacionadas com a energia e as não relacionadas com a energia. No que respeita à primeira categoria podemos dizer que as medidas enumeradas para reduzir o consumo de energia são também eficientes na redução das emissões de CO_2 . Outras opções para diminuir as emissões de CO_2 são a substituição do tipo de combustível e a diminuição do rácio clínquer/cimento ou aplicação de cimentos compostos.

5.2.4.1 Substituição do Tipo de Combustível

A substituição de combustíveis com alto teor de carbono por outros com menor teor de carbono (por exemplo mudar de carvão para gás natural) é uma das medidas disponíveis para diminuir as emissões de CO₂, mas pode envolver custos significativos para a indústria, entre os 25 e os 50 Euros por tonelada de CO₂ evitada (Gale, 1999).

5.2.4.2 Aplicação de Cimentos Compostos

No estágio final de produção do cimento, o clínquer é misturado com aditivos e moído para se atingir um pó fino. Estes aditivos afectam a força, tempo de cura e outras características do cimento. O tipo de cimento mais comum, o cimento portland, tem uma percentagem de clínquer de 95%; aumentando a quantidade de aditivos na mistura, isto é, diminuindo o rácio clínquer/cimento, menos clínquer será necessário de modo que a energia necessária por tonelada de cimento diminui, apesar da eficiência do processo não ser melhorada. Ao mesmo tempo, uma menor produção de clínquer significa menores emissões de CO₂ a partir da dissociação do carbonato de cálcio durante a fase de calcinação da produção do clínquer.

As reduções potenciais de GEE conseguidas através da aplicação de cimentos compostos podem ultrapassar significativamente as de projectos relacionados com a eficiência energética, pois o grande volume de produção de cimento implica que pequenas alterações na proporção do clínquer possam ter grandes efeitos no consumo específico de energia por tonelada de cimento (OCDE, 2000).

O uso de cimentos compostos reduz o consumo de energia e oferece uma oportunidade para reduzir os impactes ambientais, uma vez que os aditivos podem ser resíduos de outras instalações industriais (escórias e cinzas volantes). Os cimentos compostos são muito comuns na Europa, onde o cimento portland composto constituiu 44% da produção de cimento em 1997 (Martin, 1999). No entanto, existem algumas barreiras tecnológicas a um maior uso de cimentos compostos. Uma das barreiras são os códigos de construção em muitos países, que ditam as características químicas e físicas do cimento usado na construção; propriedades restritivas, como o tempo de cura, podem limitar o uso de cimentos compostos e assim desencorajar a sua produção. De facto, o aumento da fracção de aditivos no cimento leva a tempos de cura mais

longos, mas tendo como resultado um produto final mais resistente (Ruth, 2000). Outra barreira é a indisponibilidade de materiais aditivos. Do ponto de vista económico, os cimentos compostos são mais competitivos porque apesar dos custos dos aditivos dependerem grandemente dos custos de transporte são ainda consideravelmente mais baixos que os custos de produção de cimento (Worrel, 1998).

O potencial futuro de aplicação de cimentos compostos depende do nível de aplicação actual, da disponibilidade de aditivos e das normas e exigências regulamentares. O potencial de redução de emissões através da produção de cimentos compostos, estimado por Worrel (Worrel, 1998) para 24 países da OCDE, Europa de Leste e América Latina (produtores de 35% do cimento a nível mundial), varia entre os 0% e os 29%. O potencial de redução médio em todos os países foi estimado em 22%. Foi desprezável para países já com grande produção de cimentos compostos, como a Holanda, ou com pouca disponibilidade de materiais aditivos, ou seja, países sem grande tecido industrial e sem centrais de produção de electricidade a carvão, como a Costa Rica e a Guatemala. O potencial é elevado para países sem grande produção de cimentos compostos e com uma indústria bem desenvolvida e produção de energia com base no carvão, de que são exemplo o Reino Unido e os EUA.

5.3 Outras Técnicas

5.3.1 Co-Geração

Um sistema que tem sido implementado em algumas instalações de produção de cimento é a co-geração, em que a energia útil contida nos gases de exaustão provenientes do forno, arrefecedor e pré-aquecedor é convertida em electricidade. Os sistemas de co-geração podem ser turbinas de gás directas que usam o calor residual (“top cycle”), ou um sistema de caldeira de calor residual que depois faz funcionar o sistema de turbinas a vapor (“bottom cycle”). Este último tem sido instalado em muitas fábricas e provou a sua viabilidade económica, com poupanças estimadas em 20 kWh/t clínquer. Os custos de instalação estão estimados em 2 a 4 Euros por tonelada de capacidade de clínquer e custos de operação em 0.2 a 0.3 Euros por tonelada de clínquer (Martin, 1999).

5.3.2 Co-Incinação

Os fornos de cimento reúnem algumas características que lhes permitem queimar resíduos, perigosos ou não, como combustível. Os tipos de combustíveis mais usados são pneus usados, borracha, papel usado, óleos usados, madeiras, lamas de celulose, lamas residuais, plásticos e solventes usados (De Beer, 2001). Devido às suas propriedades físicas, alguns resíduos não podem ser facilmente utilizados no processo cimenteiro, o que torna a sua preparação uma etapa indispensável. A preparação faz-se numa instalação de tratamento geralmente externa às cimenteiras dada a especificidade das tecnologias envolvidas.

Os resíduos podem ser alimentados ao queimador principal ou ao queimador secundário. No queimador principal os resíduos são decompostos na zona de combustão primária a temperaturas de 2000°C. Resíduos alimentados ao queimador secundário, no pré-aquecedor ou no pré-calcinador são queimados a temperaturas mais baixas, por vezes demasiado baixas para permitir a decomposição de compostos orgânicos halogenados. Assim, o local de injeção mais apropriado é o queimador principal, onde a temperatura e o tempo de residência são maximizados.

O uso de resíduos parece não gerar emissões adicionais, embora se deva ter atenção a elementos altamente voláteis como o mercúrio, tálio, cádmio e cloro (De Beer, 2001). Outros aspectos importantes a considerar no uso de combustíveis alternativos são a eficiência energética da combustão de resíduos, destino alternativo dos resíduos e a produção de resíduos secundários.

Alguns estudos sugerem que a aplicação de resíduos como combustível, além de permitir uma redução da deposição de resíduos em aterros, poderá fornecer uma oportunidade importante para reduzir as emissões de CO₂ comparando com as actuais técnicas de produção utilizando combustíveis fósseis (Worrel, 1998). No entanto, é necessário considerar que os resíduos podem ser usados como combustível numa variedade de instalações tais como os incineradores com ou sem produção de energia e centrais termoeléctricas, parecendo bastante complicado estabelecer as emissões de CO₂ evitadas para cada uma das instalações. É também necessário considerar que alguns dos materiais queimados como combustível poderiam ser reciclados.

A co-incineração é uma opção interessante que se apresenta à indústria cimenteira, pois além da poupança em combustível recebe uma dada quantia por cada tonelada de resíduos

tratados/eliminados. O processamento de resíduos nas indústrias cimenteiras é viável técnica e economicamente e é já uma prática corrente em vários países da Europa (França, Alemanha, Suíça, Bélgica, Noruega, Reino Unido e outros).

As possibilidades futuras de uso de resíduos como combustível na indústria cimenteira diferem de país para país. As barreiras são a disponibilidade de resíduos adequados, a falta de infra-estruturas para recolher os resíduos úteis, a legislação, a opinião pública e a competição com incineradores dedicados. Prevê-se para 2010 que 17% da energia necessária na indústria cimenteira seja fornecida por resíduos (Cembureau, 2001). No entanto, este número foi estimado considerando todas as barreiras que se colocam à implementação da co-incineração e não apenas as barreiras técnicas, pelo que o potencial técnico poderá ser mais elevado.

5.4 Investigação e Desenvolvimento (I&D)

Nesta secção são apresentadas algumas tecnologias que não estando ainda disponíveis comercialmente, se encontram em fase de investigação e desenvolvimento com vista a uma possível aplicação futura no processo de produção de cimento.

5.4.1.1 Forno de Leito Fluidizado

O forno de leito fluidizado é um conceito inteiramente novo para produzir clínquer, estando actualmente a ser desenvolvido no Japão e nos EUA. Neste tipo de processo o forno rotativo é substituído por um forno estacionário, em que o material é calcinado num leito fluidizado, utilizando-se também ciclones pré-aquecedores.

As vantagens esperadas desta tecnologia são os baixos custos de capital devido ao tamanho reduzido do equipamento, menores temperaturas que resultam em menores emissões de NOx e maior variedade dos combustíveis a utilizar, assim como menor uso de energia. Espera-se que o consumo de energia seja 10 a 15% inferior ao dos fornos rotativos tradicionais (Martin, 1999).

5.4.2 Tecnologias de Fragmentação Avançadas

A moagem é um dos processos que mais electricidade consome na produção de cimento e as técnicas de moagem correntes são altamente ineficientes: mais de 95% do input energético é

perdido como calor residual, enquanto apenas 1 a 5% é usado para criar nova área superficial (Martin, 1999). Apesar dos processos actuais de alta pressão já terem melhorado a eficiência de moagem em comparação com os moinhos com corpos moentes convencionais, a longo prazo podem esperar-se melhorias adicionais na eficiência quando se tornarem disponíveis novas tecnologias de moagem não mecânicas; estas poderão basear-se em ultra-sons, choque térmico, choque eléctrico ou criogenia. No entanto, estas tecnologias não foram ainda demonstradas e não estarão disponíveis comercialmente nas próximas décadas. Apesar das poupanças teóricas de energia com as tecnologias de fragmentação avançadas serem grandes, não pode ainda ser dada uma estimativa (Martin, 1999).

5.4.3 Redução Catalítica Selectiva

A redução catalítica selectiva é um processo que reduz os óxidos de azoto a azoto com a ajuda de amónia na presença de um catalisador. Nesta técnica, a amónia diluída no ar ou vapor, é injectada nos gases quentes que passam depois num leito catalisador onde ocorrem as reacções de redução de NOx. A eficiência de destruição do NOx depende da temperatura, rácio molar NH_3/NOx e tempo de residência do gás no leito catalisador.

Esta tecnologia é já aplicada com sucesso para a redução das emissões de NOx noutras indústrias, como centrais a carvão e incineradoras. Na indústria cimenteira não existem ainda aplicações de larga escala, tendo apenas sido realizados alguns testes piloto em que se obtiveram resultados de 100 a 200 mg/m^3 , sem perda da actividade do catalisador. As características dos gases resultantes da produção de cimento requerem que a tecnologia aplicada a outras indústrias seja modificada antes de ser aplicada à indústria cimenteira. As principais incertezas estão relacionadas com o conteúdo elevado de partículas nos gases, técnicas de remoção das poeiras do catalisador, tempo de vida dos catalisadores e custos de investimento totais. Prevê-se eficiência de redução das emissões de NOx na ordem dos 85 a 95% e custos de 3.5 a 4.5 milhões de Euros (Cembureau, 1999).

5.4.4 Gestão de Picos de CO para Precipitadores Electrostáticos

Uma das desvantagens dos precipitadores electrostáticos (PE) usados para o despoeiramento dos gases de exaustão, é o facto da protecção contra explosões provocadas por picos de CO causar

emissões de partículas muito elevadas, devido à interrupção do seu funcionamento. Os analisadores de CO instalados na maior parte das fábricas analisam o conteúdo em CO do gás extraído da conduta de exaustão principal. Se a concentração de CO exceder um determinado valor é cortado o fornecimento de energia aos eléctrodos do PE, para evitar o risco de explosão; durante estas paragens as emissões de partículas podem ser bastante elevadas. Geralmente estas paragens ocorrem 5 a 20 vezes por ano, mas este número pode ser bastante reduzido através de uma boa gestão dos picos de CO (Cembureau, 1999).

Actualmente o valor de CO para o qual o EP é desligado é bastante inferior ao limite de explosão de CO devido ao lento tempo de resposta dos analisadores e ao atraso causado pela extracção e transporte do gás até ao analisador. Um bom sistema de gestão de picos de CO deverá incluir uma análise de CO rápida antes do PE, interpretação automática da concentração de CO e redução automática da alimentação de combustível para níveis mais elevados de CO (Cembureau, 1999). Estes sistemas de gestão dos picos de CO não estão ainda completamente desenvolvidos, mas estima-se que o potencial de redução das concentrações de partículas possa atingir os 15%, com custos totais de cerca de 0.01 Euros por tonelada de clínquer produzido (Cembureau, 1999).

5.4.5 Polímeros Minerais

O clínquer é feito pela calcinação do carbonato de cálcio, que liberta CO₂ para a atmosfera, deixando os silicatos de cálcio como agente ligante. Em substituição do clínquer podem ser produzidos polímeros minerais, a partir de compostos alumino-silicatos inorgânicos calcinados misturados com escórias ou cinzas volantes. Já nos anos 80 se pesquisava nesta área na Europa de Leste e EUA, mas a investigação continua. A produção dos polímeros minerais é feita a temperaturas relativamente baixas (750°C) quando comparadas com as temperaturas necessárias para a produção de clínquer, no entanto não há ainda na literatura dados sobre o consumo de energia (Martin, 1999).

5.4.6 Remoção de CO₂ dos Gases Libertados

As emissões de CO₂ para a atmosfera podem ser reduzidas através da remoção do CO₂ dos gases de exaustão. Nesta técnica, o CO₂ é separado durante ou após o processo de produção e

posteriormente armazenado ou deposto em local que não a atmosfera. A remoção do CO_2 pode ser dividida em 3 passos distintos: recuperação do CO_2 , transporte do CO_2 para o local onde será lido posteriormente e deposição final.

Devido à grande percentagem de CO_2 nos gases com origem no processo de calcinação, a combustão numa atmosfera de CO_2 e O_2 pode a priori ser uma técnica promissora para a recuperação do dióxido de carbono. Nesta técnica em vez de ar é usado O_2 para a combustão, ou seja, o azoto molecular (N_2) é removido numa instalação de separação do ar antes do combustível ser oxidado. O problema desta abordagem são as elevadas temperaturas de combustão estequiométricas, que poderá ser resolvido e até transformado em vantagem pela reciclagem do CO_2 produzido. Deste modo, a adição de mais ou menos CO_2 reciclado poderá controlar a temperatura de combustão. Um benefício adicional desta técnica é o facto de deixarem de ser necessárias instalações de eliminação de óxidos de azoto e dióxido de enxofre.

Esta técnica foi já aplicada no Japão e nos EUA, em instalações de produção de electricidade, com eficiências de captura da ordem dos 70% (Worrel, 1998). Neste estágio de investigação não é ainda claro se esta técnica pode ou não ser aplicada nas instalações de produção de cimento, pois permanecem sem resposta várias questões, tal como a influência do meio de combustão no processo de calcinação. Os custos previstos para a aplicação desta técnica situam-se entre 50 e 250 Euros por toneladas de CO_2 capturada; é, no entanto, uma das poucas opções que permitirão reduzir significativamente as emissões de CO_2 (Gale, 1999).

6. LEGISLAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL APLICÁVEL

Neste capítulo é feita uma análise da legislação energética e ambiental mais relevante, aplicável à produção de cimento em Portugal e uma comparação entre os limites de emissão de poluentes atmosféricos estabelecidos na legislação portuguesa e os limites estabelecidos em outros países Europeus. Até 1986, data de adesão de Portugal à então Comunidade Económica Europeia, a legislação relativa a aspectos ambientais, e mesmo energéticos, era escassa. A partir dessa data, a transposição das Directivas Europeias para a legislação nacional, permitiu a inclusão das preocupações ambientais na legislação.

6.1 Legislação Nacional

6.1.1 Legislação Energética

Na legislação energética aplicável ao sector cimenteiro há a destacar o Regulamento de Gestão do Consumo de Energia (RGCE), estabelecido pelo Decreto-Lei (DL) 58/82 de 26 de Fevereiro, que surge como resposta às crises energéticas da década de setenta. Este Regulamento é aplicável, entre outras, a qualquer instalação ou empresa com um consumo energético superior a 1000 toneladas de equivalente de petróleo por ano (1000 tep/ano). A indústria cimenteira está assim obviamente abrangida por este regulamento; recorde-se que em 1998 o consumo total das seis instalações produtoras de cimento nacionais ultrapassou as 800,000 tep. O RGCE obriga as indústrias por si abrangidas à realização de planos de racionalização que estabeleçam as metas de redução dos consumos específicos de energia por tipo de produto ou de instalação, cobrindo um período de 5 anos. As metas de redução não poderão ser inferiores aos valores calculados pela equação [2]:

$$M = \frac{C - K}{2} * \frac{n}{5} \quad [2]$$

em que:

M – redução do consumo específico a obter até ao fim do ano n de aplicação do plano de racionalização;

C – consumo específico verificado no exame da instalação;

K – valor definido pela Direcção Geral de Energia (DGE), para cada tipo de produto ou de instalação e que terá como valor limite inferior 90% do consumo específico verificado na instalação, do país com menor consumo específico.

Os valores de M, C e K são referidos a quilogramas de equivalente petróleo (kgep) por unidade de produto ou serviço obtido.

O despacho da DGE de 29 de Abril de 1983, estabeleceu os valores de K para a produção de cimento. Estes valores são apresentados no Quadro 16.

Quadro 16 – Valores de K para a produção de cimento

Produtos	K (kgep/t)
Clínquer para cimento normal	92
Clínquer para cimento branco	226
Cimento normal e branco (moagem de clínquer)	11

6.1.2 Legislação Ambiental

A legislação ambiental aplicável à produção de cimento pode ser dividida em vários sectores: qualidade do ar, uso do solo e prevenção e controlo integrados de poluição.

6.1.2.1 Qualidade do Ar

O DL n.º 352/90 de 9 de Novembro estabelece o regime de protecção e controlo da qualidade do ar e resulta da transposição para o direito interno de várias Directivas Comunitárias. Entre os objectivos fundamentais do sistema de protecção e controlo da qualidade do ar destacam-se a criação do quadro normativo adequado para a gestão do recurso «ar», de forma a proteger a saúde pública, o bem-estar das populações e a conservação da Natureza, e o estabelecimento de medidas obrigatórias, preventivas e correctivas, para assegurar que os níveis dos poluentes atmosféricos não ultrapassem os valores máximos das normas de qualidade do ar.

O DL n.º 352/90 obriga ao autocontrolo das emissões sujeitas a valores limite, devendo este ser feito por medição continua ou por medições pontuais, mediante determinadas condições, pelo menos duas vezes por ano, e ao envio dos resultados para as entidades competentes. As emissões gasosas de uma instalação não podem violar os valores limite de emissão, devendo, se tal se verificar, ser adoptadas medidas de redução das emissões.

A instalação, ampliação e alteração de estabelecimentos industriais (em cuja lista está incluído o fabrico de cimento) que sejam fonte de emissão de poluentes atmosféricos ficam sujeitas ao cumprimento de regras e normas de segurança a verificar pelos serviços do Ministério do Ambiente e Recursos Naturais. São também estabelecidas as condições e normas de descarga dos poluentes atmosféricos (altura das chaminés e aspectos relativos à sua construção).

O DL n.º 352/90 remete para a Portaria n.º 286/93 de 12 de Março, dos Ministérios da Indústria e Energia e do Ambiente e Recursos Naturais, a fixação dos valores limite e os valores guia no ambiente para o dióxido de enxofre, partículas em suspensão, dióxido de azoto e monóxido de carbono, valor guia para o ozono e o valor limite para o chumbo, e os respectivos métodos de medição. Os limites de emissão para o sector cimenteiro estabelecidos na Portaria n.º 286/93 são apresentados no Quadro 17.

Quadro 17 – Limites de emissão para o sector cimenteiro

Fonte	Partículas	SO ₂	NO _x (expresso em NO ₂)
Fornos	100 mg.Nm ⁻³	400 mg.Nm ⁻³	1,300 mg.Nm ⁻³
Moinhos	75 mg.Nm ⁻³	-	-
Outras fontes	50 mg.Nm ⁻³	-	-

A Portaria estabelece também limites de emissão de aplicação geral; estes são apresentados no Quadro 18.

Quadro 18 – Limites de emissão de aplicação geral

Sulfureto de hidrogénio (H ₂ S)	50 mg.Nm ⁻³
Monóxido de carbono (CO)	1,000 mg.Nm ⁻³
Compostos orgânicos (expresso em C total)	50 mg.Nm ⁻³
Compostos orgânicos fluorados (exp. em F ⁻)	50 mg.Nm ⁻³
Compostos orgânicos clorados (exp. em Cl ⁻)	50 mg.Nm ⁻³
Cádmio (Cd) + Mercúrio (Hg)	0.2 mg.Nm ⁻³
Arsénio (As) + Níquel (Ni)	1 mg.Nm ⁻³
Chumbo (Pb) + Crómio (Cr) + Cobre (Cu)	50 mg.Nm ⁻³

6.1.2.2 Uso do Solo

A legislação relativa ao uso de solo aplicável ao sector cimenteiro está relacionada com a exploração das pedreiras. O DL n.º 89/90 de 16 de Março, aprova o Regulamento de Pedreiras, onde são definidos os princípios orientadores da exploração de pedreiras, com vista ao seu aproveitamento técnico-económico racional e valorização. A preservação da qualidade do ambiente e a recuperação paisagística são dois aspectos importantes abordados neste documento. É estabelecido que compete aos exploradores de pedreiras tomar as providências adequadas à garantia da minimização do impacte ambiental e também a obrigatoriedade da adopção de medidas que garantam essa minimização (tipo de equipamentos a utilizar, combate à formação de poeiras e respectivos acessos). No que respeita à recuperação paisagística, a exploração e o abandono das pedreiras ficam sujeitos a várias medidas das quais se destacam: a construção de instalações adaptadas o mais possível à paisagem envolvente; finda a exploração, e desde que tecnicamente possível, a reconstituição dos terrenos para utilização de acordo com finalidades a que estavam adstritos antes do início da mesma.

O DL n.º 162/90 de 22 de Maio, aprova o Regulamento Geral de Segurança e Higiene no Trabalho nas Minas e Pedreiras, que tem por objectivo a prevenção técnica dos riscos profissionais e a higiene nos locais de trabalho onde se desenvolvem actividades de exploração das mesmas. Neste diploma dão estabelecidas as obrigações gerais da entidade empregadora e dos trabalhadores. São também estabelecidas, entre outras, normas relativas à utilização e manipulação de explosivos, método de exploração da pedra, concentrações máximas admissíveis em poeiras respiráveis no ar dos locais de trabalho (teor em sílica) e protecção contra o ruído (adopção de medidas adequadas à eliminação, redução e propagação dos ruídos e uso de protectores auriculares adequados).

6.1.2.3 Prevenção e Controlo Integrados da Poluição

O DL n.º 194/2000 de 21 de Agosto resulta da transposição da Directiva n.º 96/61/CE, relativa à Prevenção e Controlo Integrados da Poluição, que constituiu a concretização de uma nova tendência na estratégia de abordagem do combate à poluição. Reconhece-se nesta Directiva que a existência de abordagens diferentes no controlo da poluição do ar, das águas e do solo pode

favorecer a transferência dos problemas de poluição entre os meios físicos, em vez de favorecer a protecção do ambiente no seu todo. Assim, o DL n.º 194/2000 tem por objecto “a prevenção e o controlo integrados da poluição proveniente de certas actividades e o estabelecimento de medidas destinadas a evitar ou, quando tal não for possível, a reduzir as emissões dessas actividades para o ar, a água ou o solo, a prevenção e controlo do ruído e a produção de resíduos, tendo em vista alcançar um nível elevado de protecção do ambiente no seu todo”.

Os aspectos mais relevantes do diploma aplicáveis ao sector cimenteiro são os elementos a ter em conta na determinação das melhores técnicas disponíveis e a necessidade de licenciamento ambiental para instalações existentes, alterações de instalações existentes e novas instalações.

6.1.2.4 Outra Legislação

Existe também legislação ambiental aplicável às cimenteiras nas seguintes áreas:

- **Avaliação de Impactes Ambientais:** O DL 69/2000 de 3 de Maio, resultante da transposição da Directiva 85/337/CEE, estabelece o regime jurídico da avaliação de impacte ambiental dos projectos públicos e privados susceptíveis de produzirem efeitos significativos no ambiente. A indústria cimenteira é abrangida neste Decreto-Lei como indústria extractiva e como indústria de minerais não metálicos.
- **Gestão de Resíduos:** Legislação relativa à recolha, transporte, armazenagem, tratamento prévio, regeneração, recuperação, combustão e incineração de óleos usados, Plano Estratégico de Gestão dos Resíduos Industriais e o Regulamento Nacional do Transporte de Mercadorias Perigosas por Estrada.
- **Gestão dos Recursos Hídricos:** O DL n.º 46/94 de 22 de Fevereiro, estabelece o regime de licenciamento da utilização do domínio hídrico, e o DL n.º 236/98 de 1 de Agosto fixa as normas de qualidade da água.
- **Controlo do Ruído:** O Regulamento Geral do Ruído, aprovado pelo DL n.º 292/2000 de 14 de Novembro, tem por objecto a prevenção do ruído e o controlo da poluição sonora, e é aplicável, entre outras, à laboração de estabelecimentos destinados à indústria, comércio e serviços. Estabelece a obrigatoriedade de controlos preventivos, podendo obrigar à apresentação de um plano de redução ou programa de monitorização do ruído e à adopção de medidas.

6.2 Legislação Comunitária

Nesta secção é feita referência à Directiva 94/67/CE do Conselho, de 16 de Dezembro, relativa à incineração de resíduos perigosos, que ainda não foi transposta para a legislação Portuguesa. A Directiva tem por objectivo estabelecer medidas e procedimentos que previnam ou, quando tal não for possível, reduzam ao mínimo os efeitos negativos no ambiente, em especial a poluição do ar, do solo e das águas superficiais e subterrâneas, bem como os riscos para a saúde das pessoas, resultantes da incineração de resíduos perigosos e, para o efeito, criar e manter condições de exploração e valores-limite de emissão adequados para as instalações de incineração de resíduos perigosos na Comunidade. Os valores-limite estabelecidos na Directiva são consideravelmente inferiores aos estabelecidos actualmente pela legislação portuguesa, como se pode ver no Quadro 19. Uma chamada de atenção ao facto de os valores apresentados para a legislação portuguesa serem diferentes dos apresentados anteriormente nos Quadros 17 e 18: enquanto no primeiro os valores são expressos para um teor de O₂ de 8%, neste Quadro são expressos para 10% de O₂, de modo a poder ser feita a comparação com a legislação comunitária.

Quadro 19 – Comparação das normas de emissão nacionais para cimenteiras a funcionar normalmente e com as normas da UE para cimenteiras a co-incinerar resíduos

	Legislação Portuguesa para Cimenteiras	Legislação da UE para Co-Incineração em Cimenteiras
Partículas	42-85	30
HCl	212	10
HF	42	1
NO _x	1100	500-800
SO ₂	338	50
Carbono Orgânico Total	42	10
CO	846	-
Dioxinas/furanos	-	0.1
Hg	-	0.05

Fonte: EIPCCB, 2000

6.3 Comparação da Legislação Nacional com a de Outros Países Europeus

Nesta secção os limites nacionais de emissão de poluentes atmosféricos aplicáveis às cimenteiras são comparados com os limites estabelecidos em outros países Europeus. Embora vários países apresentem limites diferentes para instalações já existentes e para novas instalações, no Quadro 20 são apresentados apenas os valores estabelecidos para instalações já existentes.

Quadro 20 – Limites de emissão para Portugal e para outros países Europeus

País	Partículas (mg/Nm ³)		SO ₂ (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)
	Forno	Moinhos		
Áustria ^{a)}	50	50	200	1000
Bélgica	50-150	50-150	1000	1800
Dinamarca ^{a)}	50	50	450	1200
Finlândia ^{a)}	50	30-50	150-400	1200-1800
França	50	50	500	1200
Alemanha	50	50	400	800
Grécia	150	150	-	-
Irlanda	50	75	400	1300
Itália	50	50	600	1800
Luxemburgo	30	-	100	800
Holanda	15	10	375 ton/ano	1300
Portugal	100	75	400	1300
Espanha	250	250	600	1300-1800
Suécia	50	50	<200	<200
Reino Unido	40	40	-	500-1200

a) 10% de O₂

Fonte: EIPCCB, 2000

Verifica-se que os limites impostos pela legislação portuguesa aplicável às cimenteiras para a emissão de partículas, NO_x e SO₂ são superiores aos limites impostos nos outros países europeus apresentados, à excepção da Bélgica, Espanha e Grécia.

7. CASO-ESTUDO SECIL-OUTÃO: ANÁLISE ENERGÉTICA, AMBIENTAL E ECONÓMICA

Neste capítulo é efectuada a caracterização e a análise da fábrica da Secil no Outão ao nível de equipamentos, consumos energéticos e impactos ambientais. O desempenho global actual da fábrica do Outão é comparado com o desempenho das melhores tecnologias disponíveis definidas no Capítulo 5, com o objectivo de identificar as áreas susceptíveis de melhoria. Para estas áreas identificadas serão propostas intervenções e para cada intervenção são determinados os aspectos económicos, energéticos e ambientais.

7.1 Caracterização da Situação Actual

7.1.1 Processo de Fabrico e Equipamentos Utilizados na Produção

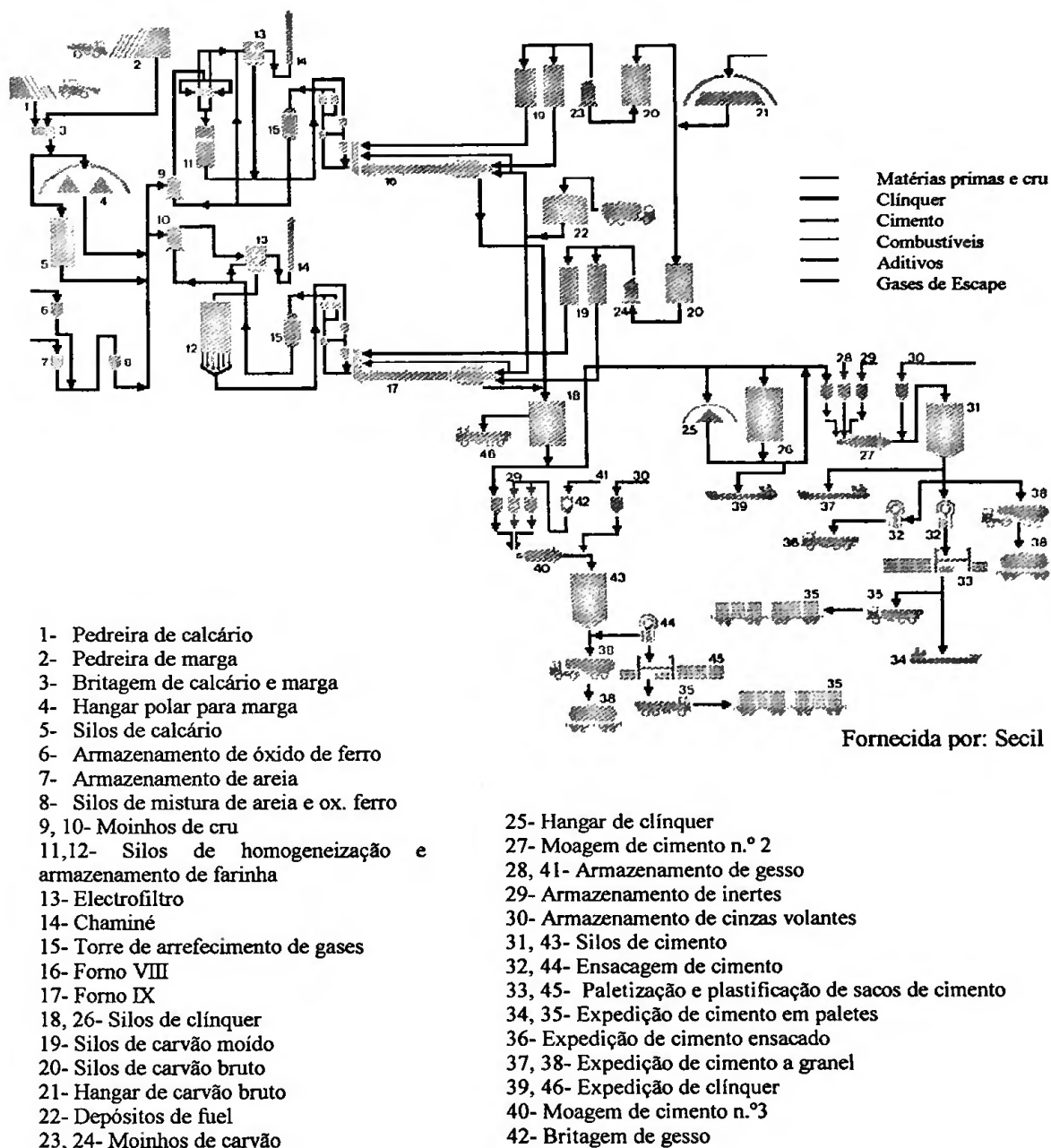
A fábrica do Outão dedica-se à produção de clínquer e de cimento através de um conjunto de operações sintetizadas na Figura 35.

7.1.1.1 Extracção de Matérias Primas

O calcário e a marga, matérias primas básicas, são obtidos a partir de pedreiras próprias da Secil situadas dentro do perímetro fabril. A pedreira a céu aberto está dividida por um vale em duas pedreiras distintas denominadas pedreira de calcário e pedreira de marga. A pedreira de calcário é constituída praticamente por uma única camada de material de cor variável e muito duro que aparece por vezes cristalizado, cujo teor em CO_3^{2-} varia entre 70% e 100%. A pedreira de marga é constituída por material menos duro do que o calcário, apresentando por vezes bolsas de argila; o seu teor em CO_3^{2-} varia entre 30% e 70%.

A exploração da pedreira assenta num plano bem definido que tem como objectivo uma exploração eficaz e a preservação do meio em que está inserida, garantindo a re-florestação das zonas já exploradas e abandonadas. No plano de exploração estão definidos patamares com 20 metros de largura e 20 metros de altura. A primeira operação da exploração é a furação seguindo-se a introdução da carga explosiva e sua explosão por detonação eléctrica temporizada.

Figura 35 – Processo de fabrico da fábrica SECIL do Outão



O material resultante dos rebentamentos, com uma granulometria que pode ir até 1 m^3 , é carregado por escavadoras e transportado até à britagem por uma frota de camiões de 50 toneladas cada. A Figura 36 mostra a exploração de uma pedreira.

Figura 36 – Exploração de uma pedreira

Fonte: www.flsmidth.com

7.1.1.2 Preparação e Armazenagem das Matérias Primas

No seguimento da operação de desmonte, o calcário e a marga são reduzidos a uma dimensão máxima de 90mm, num britador de martelos (ver Figura 37), com uma capacidade de britagem de 1000 t/h, e transportados por telas transportadoras para os locais de armazenagem. O material britado, proveniente da pedreira e adquirido no exterior (areias terrestres e óxido de ferro para correcção do cru), é armazenado em silos e armazéns individuais.

7.1.1.3 Moagem de Cru

As matérias primas em proporções bem definidas calculadas por computador e de acordo com as especificações estabelecidas para o clínquer, são retomadas automaticamente através de telas transportadoras, dos locais de armazenagem para os moinhos de cru. A moagem é constituída por dois moinhos verticais, de 3 mós cada:

- na linha 8, moinho Pfeiffer MPS 4150, com uma capacidade de 170 t/h;
- na a linha 9, moinho ATOX 50, com uma capacidade de 285 t/h (ver na Figura 38).

Figura 37 – Britador de martelos

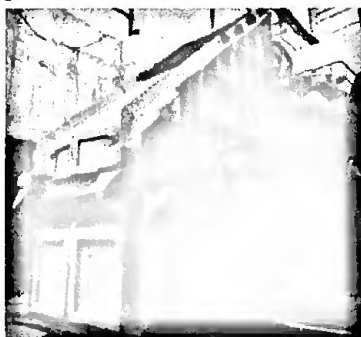


Figura 38 – Moinho de cru

Fonte: www.flsmidth.com

O ar necessário ao transporte e secagem do material moído, dentro do moinho e deste para os silos, obtém-se por aproveitamento dos gases de escape dos fornos. À entrada do moinho as matérias primas apresentam uma humidade entre 4 e 7% e depois da moagem cerca de 0.5%. No final desta operação obtém-se o cru com composição e granulometria especificadas.

7.1.1.4 Homogeneização e Armazenagem do Cru

Após a moagem o cru é transportado para os silos de homogeneização e armazenagem. A Linha 8 possui dois silos com um sistema de homogeneização que consiste no enchimento de um silo com correcções de composição de hora a hora, de modo a que quando o silo está cheio tenha a composição média desejada. É na descarga do silo de homogeneização para o silo de armazenagem que se faz a homogeneização das diferentes camadas de cru produzido. Os silos de homogeneização e de armazenagem têm uma capacidade de 10,000 t e 14,000 t respectivamente.

A Linha 9 possui um silo de 26,000 t que funciona simultaneamente como silo de homogeneização e armazenagem. O fundo está dividido em 7 sectores de extracção cada um dos quais com 6 secções, constituindo assim 42 áreas de extracção cuja sequência de extracção é programável.

A Figura 39 mostra as instalações de armazenagem e pré-homogeneização de marga no Outão.

Figura 39 – Instalações de armazenagem e pré-homogeneização de marga



Fonte: Secil, 2001c

7.1.1.5 Equipamento de Moagem e Armazenagem do Combustível

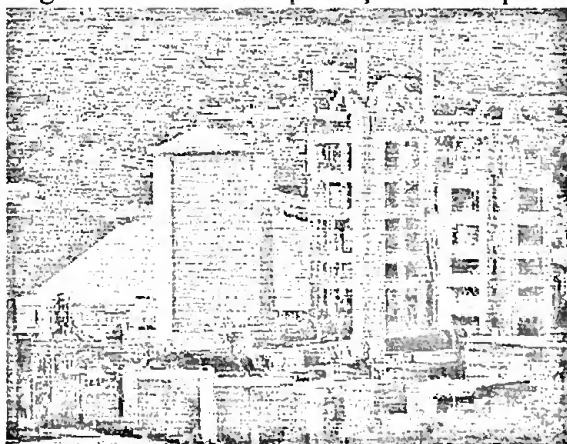
Os dois fornos existentes podem queimar carvão e/ou fuelóleo, sendo actualmente o carvão o combustível principal e o fuelóleo apenas usado para os acendimentos dos fornos.

O carvão é armazenado numa instalação coberta de 40,000 toneladas de capacidade e transportado até às instalações de moagem por telas transportadoras de borracha. Aí o carvão é moído em dois moinhos verticais de três mós com capacidades de moagem de 16 t/h e de 23 t/h. Estes moinhos, tal como os moinhos de cru, fazem uso dos gases de exaustão dos fornos para o transporte e secagem do carvão. O carvão moído é armazenado em silos de 360m³ e alimentado aos fornos a partir de silos intermédios. Cada linha tem dois silos intermédios, um para a alimentação do queimador principal e outro para os queimadores instalados na torre de pré-aquecimento. Para o fuelóleo existem duas caldeiras de fluido térmico que o mantêm nas condições de temperatura e viscosidade adequadas à sua queima.

7.1.1.6 Produção de Clínquer

A instalação de queima da Linha 8, com uma capacidade de produção nominal de 2,150 t/dia de clínquer, é constituída por um forno rotativo com 5 metros de diâmetro e 80 m de comprimento, equipado com uma torre de ciclones de 4 estágios e 10 arrefecedores planetários. A Linha 9 é constituída por um forno rotativo com 5,25 metros de diâmetro e 83 m de comprimento, equipado com uma torre de ciclones de 4 estágios e 9 arrefecedores planetários. A sua produção nominal é de 3,500 t/dia de clínquer. A Figura 40 mostra as duas linhas de produção de clínquer do Outão.

Figura 40 – Linhas de produção de clínquer



Fonte: Secil, 2001c

O cru é retirado dos silos de armazenagem, pesado e transportado até à parte superior das torres de pré-aquecimento por processos inteiramente automatizados. A permuta de calor em contra-

corrente nas torres de ciclones faz com que o cru, que à entrada apresenta uma temperatura de cerca de 65°C, chegue à entrada do forno com uma temperatura de 900°C. A condução do processo, centralizada numa sala de comando, é controlada através de um sistema de monitorização e correcção face a valores de referência, para os diferentes parâmetros do processo. Para armazenar o clínquer estão disponíveis três silos (capacidade de 76,000 t) e ainda um hangar coberto (30,000 t).

7.1.1.7 Moagem e Armazenagem do Cimento

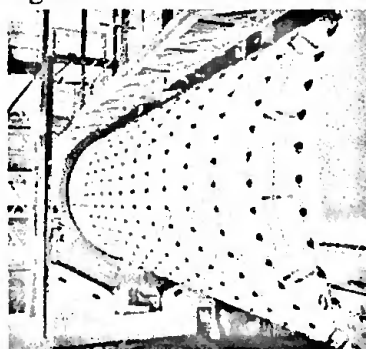
O clínquer, gesso e demais aditivos são transportados do seu local de armazenagem, através de elevadores de alcatruzes e telas transportadoras, até aos moinhos onde são triturados em proporções bem definidas de acordo com as especificações de fabrico.

O cimento fabricado é obtido em três moagens obtidas a partir de 4 moinhos tubulares:

- Moagem I: moinho 1 de três câmaras e circuito aberto com uma capacidade de 30 t /h;
- Moagem II: moinho 4 de duas câmaras e circuito fechado com uma capacidade de 99 t/h e moinho 6 de duas câmaras e circuito fechado com uma capacidade de 52 t /h;
- Moagem III: moinho 5 de duas câmaras e circuito fechado com capacidade de 150 t/h.

O cimento produzido é transportado por via pneumática e/ou mecânica e armazenado em 11 silos com uma capacidade total de 46 000 toneladas. A Figura 41 mostra um dos moinhos de cimento utilizados no Outão.

Figura 41 – Moinho de cimento



Fonte: www.flsmidth.com

7.1.1.8 Embalagem e Expedição

O cimento pode ser ensacado ou vendido a granel, sendo a sua expedição a granel feita por via rodoviária, ferroviária (envolve transporte rodoviário até à estação de Setúbal) ou marítima.

7.1.2 Equipamentos de Protecção e Monitorização Ambiental

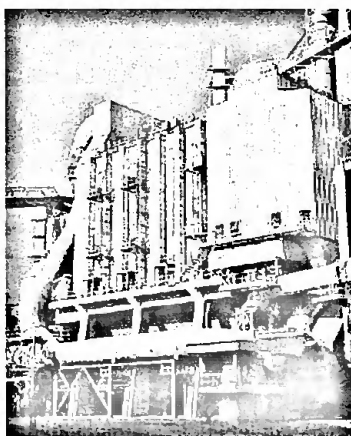
A fábrica do Outão possui equipamentos de despoeiramento ao longo da cadeia de fabrico, que além de diminuir as emissões para a atmosfera permitem a re-introdução das partículas na linha produtiva. Esses equipamentos são:

- Filtros de mangas: instalados no britador da pedreira, transporte e queda de materiais (desde a pedreira à expedição), fornos, moinhos de cimento, moinhos de carvão e equipamentos de ensacagem (total de 118).
- Electrofiltros: instalados em cinco locais diferentes para o despoeiramento dos gases provenientes dos fornos e moinhos de cimento (ver a Figura 42).

Os poluentes monitorizados em contínuo são:

- CO: princípio de medição por absorção de infravermelhos;
- NOx: princípio de medição por absorção de ultra-violeta;
- Partículas: princípio de medição por opacidade.

Figura 42 – Electrofiltro instalado no Outão



Fonte: Secil, 2001b

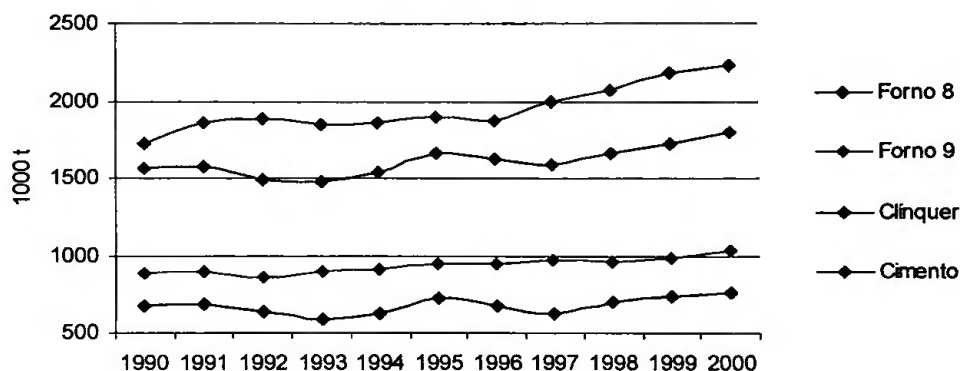
7.1.3 Produção de Cimento

No Outão, a produção de clínquer é assegurada por dois fornos cuja contribuição para a produção total é representada na Figura 43, onde também é possível verificar a evolução da produção de cimento na última década. Excepto quando referência em contrário, todos os dados apresentados a seguir foram fornecidos pela Secil.

Verifica-se que entre 1990 e o ano 2000 a produção de clínquer aumentou cerca de 15% e a produção de cimento quase 30%, o que se poderá ter devido ao aumento da incorporação de

aditivos no cimento e também à importação de algum clínquer do estrangeiro. O maior aumento na produção de clínquer e cimento teve lugar entre 1997 e 2000 (12%) em resultado da consolidação dos sistemas de comando das linhas de queima e da introdução de novos queimadores.

Figura 43– Evolução das produções de clínquer e cimento



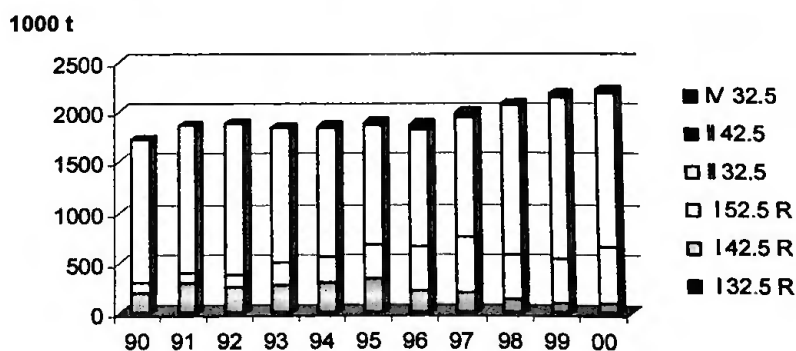
Além das matérias primas principais, já vistas na Figura 19 (Capítulo 4), a produção de clínquer e cimento incorporou também resíduos de outras fontes industriais. O Quadro 21 mostra as quantidades de resíduos incorporados em 1999.

Quadro 21 – Incorporação de resíduos industriais no cimento produzido no Outão em 1999

Resíduo Industrial	Quantidade (t)
Granalha	30381
Cinza volante	29973
Escórias	32718
Lamas de cal	2291
Pó viroc	2038
Refractário	1267
Placas viroc	752
Catalisador FCC	52

A evolução da produção dos vários tipos de cimento é visível na Figura 44.

Figura 44 – Evolução da produção dos diferentes tipos de cimento



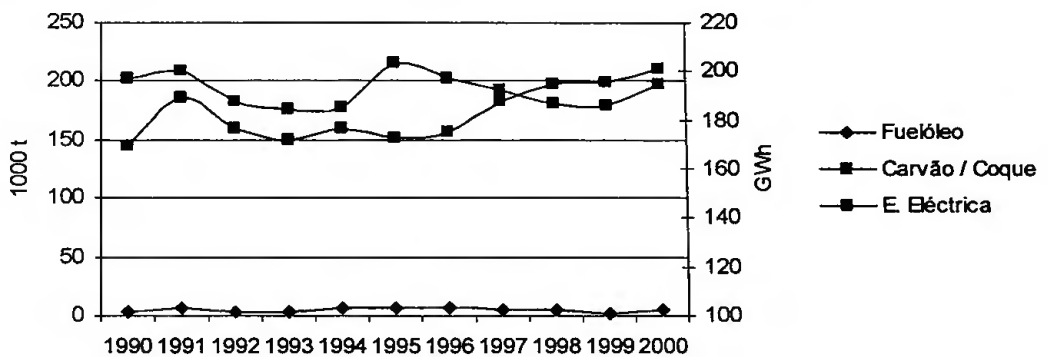
Os tipos de cimento mais produzidos são o tipo II classe 32.5 (cerca de 68% da produção total no ano 2000) e o tipo I classe 42.5R (cerca de 25%, no ano 2000). A proporção deste segundo tipo de cimento tem aumentado nos últimos anos.

7.1.4 Consumos Energéticos

7.1.4.1 Evolução

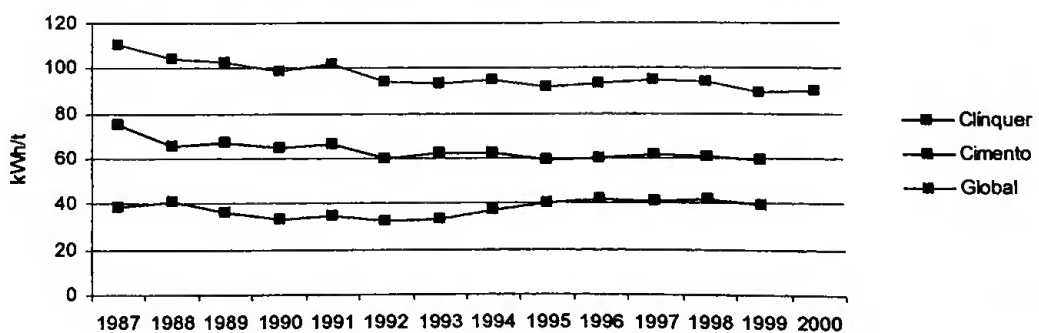
Os principais combustíveis utilizados no Outão são o fuelóleo, o carvão e o coque. A Figura 45 mostra a evolução do consumo destes combustíveis (eixo do lado direito) e também da electricidade (eixo do lado esquerdo) na última década.

Figura 45 – Evolução do consumo de combustíveis e de electricidade



Enquanto até 1994 os consumos de combustíveis e de electricidade seguiram uma evolução semelhante, a partir de 1995 verificou-se uma diminuição do consumo de combustíveis e um aumento do consumo de electricidade. Interessa verificar o significado de tal evolução pelo que se torna necessário analisar os consumos específicos de electricidade e de combustível. A Figura 46 mostra a evolução do consumo específico global de electricidade e os consumos específicos para a produção de clínquer e de cimento.

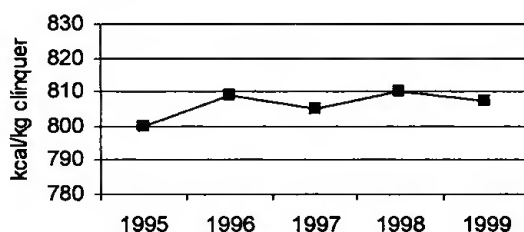
Figura 46 – Evolução do consumo específico de electricidade



Entre 1987 e 1999 verificou-se uma diminuição do consumo específico global de electricidade e do consumo específico de electricidade por unidade de clínquer. Em 1999 atingiu-se pela primeira vez no Outão um consumo inferior a 90 kWh/t de clínquer, valor inferior da gama de consumos conhecida na Europa: 90 a 130 kWh/t (Cembureau, 1999). Tal ter-se-á devido a investimentos em novos equipamentos de moagem, substituição de transportes pneumáticos por sistemas de transporte mecânicos e substituição dos ventiladores. Por seu lado, o consumo específico de electricidade por unidade de cimento verificou um aumento a partir de 1992, o que se poderá dever ao aumento da produção de cimento do tipo I classe 42.5R (com maior incorporação de clínquer).

A Figura 47 apresenta o consumo específico de combustível por unidade de clínquer produzido

Figura 47 – Evolução do consumo específico de combustível



O consumo específico de combustível tem-se mantido relativamente estável nos últimos anos, entre as 800 e as 810 kcal por quilograma de clínquer, ou seja, entre os 3.3 e os 3.4 GJ por tonelada de clínquer, valor que se encontra na gama apresentada no Quadro 3, no Capítulo 3.

Pretendia-se calcular agora a redução dos consumos específicos de energia (electricidade e combustível) verificados na SECIL nos últimos 20 anos, para comparar com o disposto no Regulamento de Gestão do Consumo de Energia (RGCE) de 1983, já referido no Capítulo 6. No entanto, para o Outão só estão disponíveis dados de consumos de energia térmica a partir de 1995. Acontece que, como é possível verificar pela análise da Figuras 47, entre 1995 e 1999 não ocorreram reduções no consumo específico de energia térmica. De facto, como é possível verificar pela Figura 26 no Capítulo 4, as grandes reduções ter-se-ão verificado até 1994.

7.1.4.2 Consumos Actuais

A produção de cimento adapta-se bem a uma metodologia de “benchmarking” ou “ponto de referência”, para avaliar o uso de energia porque consiste num número de passos distintos para

os quais o uso de energia pode ser medido. Os passos que podem ser avaliados através desta metodologia são a preparação das matérias primas, a produção de clínquer e a moagem do cimento (Ruth, 2000 e OCDE, 2000). Os valores de referência ou “benchmarks” para estes três passos principais podem ser determinados analisando o desempenho de instalações recentes e as estimativas tecnológicas das “melhores práticas” para uso de energia (Ruth, 2000). Assim, a cada processo importante no consumo de energia pode ser atribuído um valor de referência, com base na tecnologia usada.

O Quadro 22 sintetiza os equipamentos actualmente usados no Outão para cada um dos três passos considerados, e os respectivos consumos verificados no ano 2000.

Quadro 22 – Equipamentos e respectivos consumos verificados no Outão no ano 2000

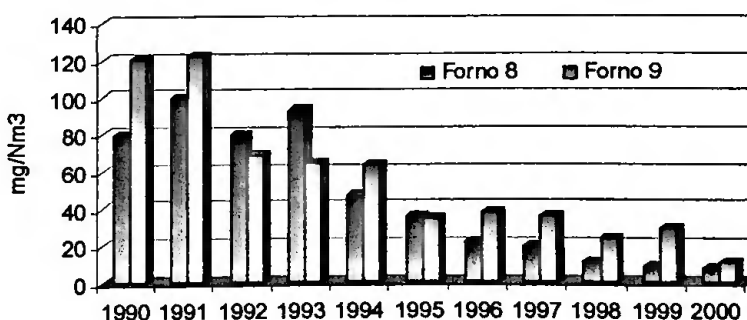
Processo	Tipo de equipamento	C. Específico de electricidade (kWh/t)	C. Específico de combustível (MJ/t clínquer)
Preparação matérias primas	Moinho de mós vertical	28	-
Sistema de queima	Forno c/ pré-aquecedor de 4 estágios e arrefecedor planetário	29.4	3379
Moagem do cimento	Moinho tubular com corpos moentes	desconhecido	-

7.1.5 Impactos Ambientais

7.1.5.1 Partículas

Entre as principais emissões de uma instalação de produção de clínquer e cimento, contam-se as emissões de partículas. A Figura 48, mostra a evolução deste poluente no Outão na última década.

Figura 48 – Evolução das emissões de partículas no Outão



O limite imposto a partir de 1993 pela legislação nacional para a emissão de partículas pelo sector cimenteiro é de 100 mg.m^{-3} , e veio substituir o anterior limite de 150 mg.m^{-3} . As emissões de partículas têm vindo a diminuir e situaram-se sempre abaixo do limite máximo estabelecido pela legislação nacional. Para tal contribuiu a instalação de equipamentos de despoeiramento e as próprias alterações e melhorias introduzidas no processo de fabrico, uma vez que a maior parte das poeiras emitidas são matéria prima e por isso há todo o interesse em recuperá-las.

7.1.5.2 Dióxido de Carbono

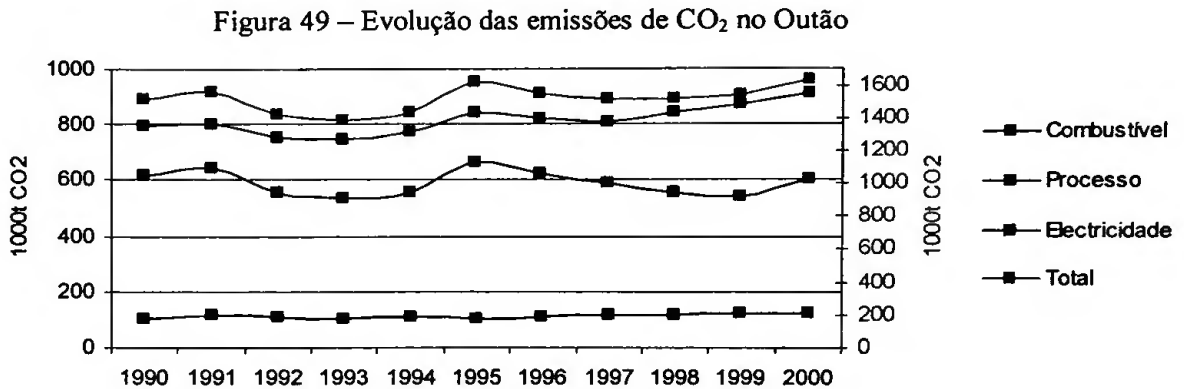
Não possuindo dados relativos às emissões de CO_2 foi necessário proceder ao seu cálculo. Para tal é necessário, como já foi visto, distinguir três fontes diferentes de emissões de CO_2 : duas fontes directas, a queima de combustível e a calcinação da matéria prima, e uma fonte indirecta resultante da produção da energia eléctrica consumida.

As emissões relacionadas com a energia eléctrica foram calculadas usando a mesma metodologia usada para o cálculo das emissões nacionais (ver secção 4.6.5.1).

Para o cálculo das emissões de CO_2 resultantes da calcinação da matéria prima, seguiu-se a metodologia recomendada pelo IPCC (IPCC, 1996b), que aponta um factor de emissão de 0.5071 toneladas de CO_2 por tonelada de clínquer produzido. Este valor foi multiplicado pela produção de clínquer em cada ano, obtendo-se a evolução das emissões de CO_2 relacionadas com o processo.

As emissões resultantes da queima de combustível foram também calculadas seguindo a metodologia e os factores de emissão propostos pelo IPCC (IPCC, 1996a). Possuindo apenas os dados da energia fornecida pelo carvão e coque de petróleo agregados, ou seja, não sabendo o peso de cada um no consumo carvão/coque, calculou-se um factor médio de emissão carvão/coque de 27.2 tC/TJ. Este factor de emissão, juntamente com o factor de emissão do fuelóleo multiplicados pelas quantidades de carvão/coque e fuelóleo respectivamente, permitiram calcular a quantidade de carbono libertada no processo de combustão para cada ano. Multiplicando as toneladas de carbono por um factor de 44/12 (factor de conversão de C para CO_2) obteve-se a evolução das emissões de CO_2 resultantes do processo de queima do combustível.

Todos os cálculos são apresentados no Anexo 3. A Figura 49 mostra a evolução da emissão de CO₂, pelas diferentes fontes, na última década na fábrica do Outão (note-se que as emissões totais estão representadas a uma escala diferente no eixo direito do gráfico).

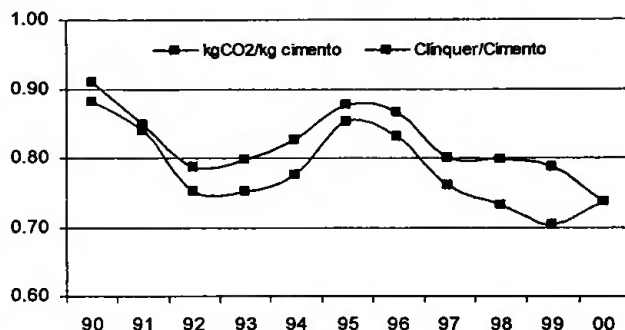


Analisando o gráfico verifica-se que a maior fonte de emissão de CO₂ é a calcinação da matéria prima (cerca de 56% das emissões totais em 2000), verificando-se mesmo uma correspondência directa entre a evolução das emissões do processo e a evolução das emissões totais de CO₂. Em 1995 encontramos um primeiro pico nas emissões resultantes do processo e do combustível, o que se reflecte nas emissões totais. Este pico deve-se a um pico na produção de clínquer, em relação aos anos anteriores e aos anos de 1996 e 1997, como se pode ver na Figura 43. Depois de 1997, enquanto as emissões de processo seguem uma tendência crescente, as emissões resultantes da queima de combustível apresentam uma tendência descendente; ou seja, a produção de clínquer aumentou sem que essa tendência fosse acompanhada pelo consumo de combustível. Esta evolução é o resultado de investimentos no sistema de queima já referidos no ponto 7.2.3. No ano 2000 verificou-se um novo pico de emissões de CO₂ para o qual todas as fontes contribuíram com subidas em relação ao ano anterior. Pode também verificar-se que as emissões indirectas de CO₂ resultantes da produção de electricidade têm uma contribuição muito menos significativa que as outras duas fontes de CO₂ (cerca de 7,5% das emissões totais em 2000). As emissões com origem nesta fonte têm seguido uma ligeira tendência de crescimento.

Interessa agora calcular a intensidade em carbono da produção de cimento, ou seja a quantidade de CO₂ libertado por unidade de cimento produzida, e seguir a sua evolução nos últimos anos.

Foi também calculada a evolução do rácio clínquer/cimento para este mesmo período. A Figura 50 mostra os resultados obtidos.

Figura 50 – Evolução da intensidade em carbono e do rácio clínquer/cimento no Outão



Verifica-se que a intensidade em carbono seguiu a mesma evolução das emissões totais de CO₂: tendência crescente de 1992 a 1995, decrescente até 1999 e depois um novo pico no ano 2000. O rácio clínquer/cimento segue a mesma tendência excepto no ano 2000, em que o rácio desce e a intensidade em carbono sobe, o que se poderá ter devido a importações de clínquer não contabilizadas no cálculo do rácio.

7.1.5.3 Outros Poluentes

Outros dois poluentes que assumem importância são os óxidos de azoto e o monóxido de carbono, cujas emissões médias nos últimos três anos no Outão são visíveis nas Figuras 51 e 52, respectivamente. A legislação portuguesa estabelece para o NO_x valores limite de emissão de 1300 mg.Nm⁻³ e para o CO 1000 mg.Nm⁻³. A emissão média anual de ambos os poluentes está actualmente abaixo dos limites.

Figura 51 - Emissões de NO_x

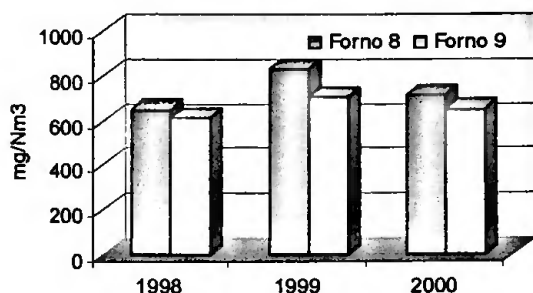
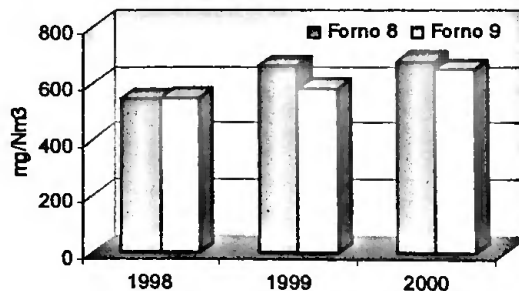


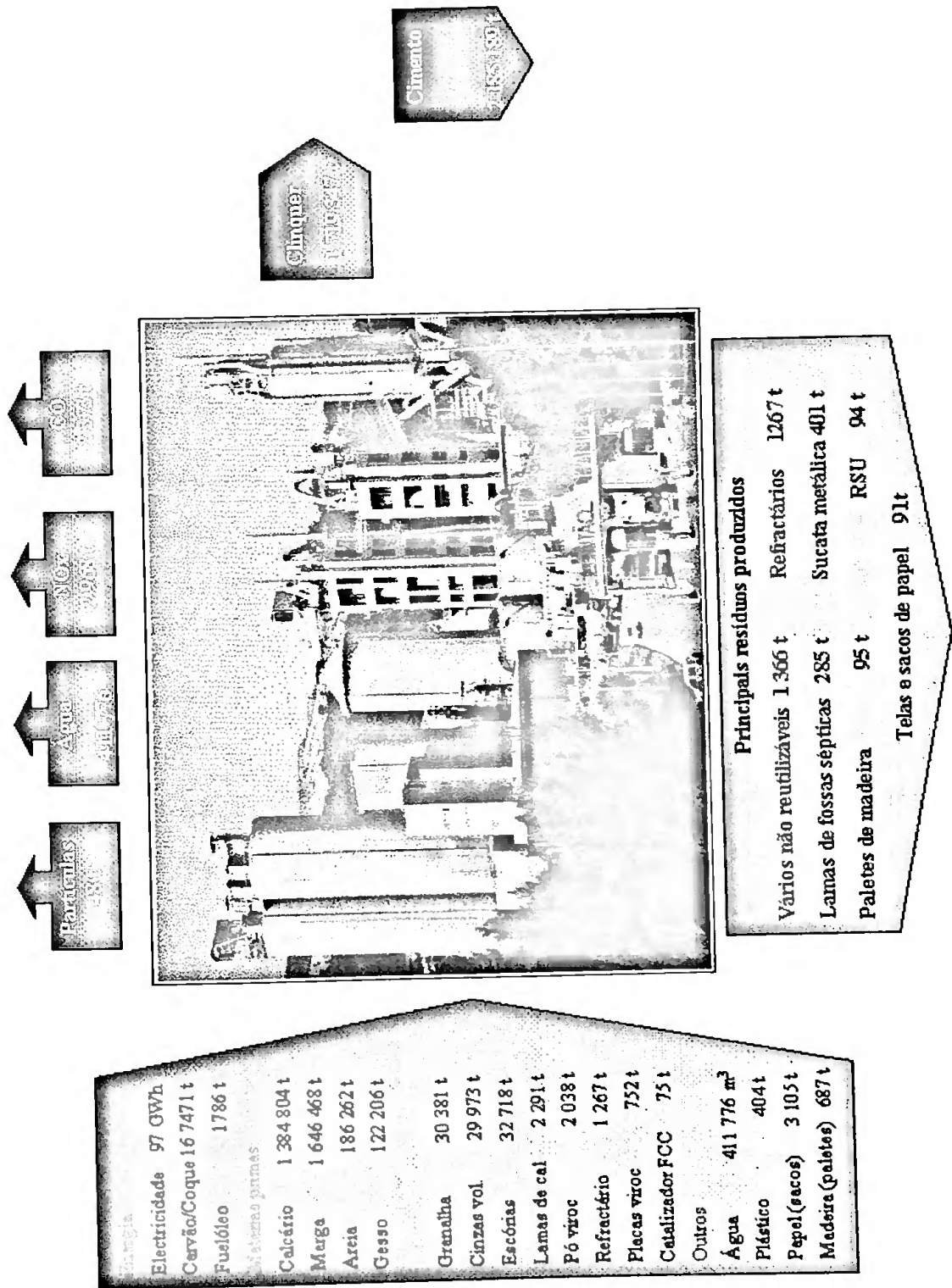
Figura 52 – Emissões de CO



7.1.6 Síntese

Na Figura 53, é apresentado um diagrama esquemático onde são sintetizados todos os consumos e impactes ambientais verificados na instalação de produção do Outão em 1999.

Figura 53 – Consumos e impactos ambientais em 1999



7.2 Selecção e Análise da Introdução de Novos Processos e Tecnologias

Tendo em atenção a situação actual da fábrica do Outão a nível energético e ambiental, podem ser seleccionadas alterações e instalação de equipamentos com vista a diminuir os consumos específicos de energia e minorar as emissões para a atmosfera. As diferentes soluções são apresentadas nos pontos seguintes. Para cada alteração seleccionada são calculadas as implicações económicas, energéticas e ambientais.

7.2.1 Consumos de Energia

Neste ponto é analisado separadamente o consumo de energia em cada uma das três operações identificadas: preparação de matérias primas, sistema de queima e moagem do cimento.

7.2.1.1 Preparação de Matérias Primas

A preparação das matérias primas pode ser desagregada em dois passos: o transporte de materiais (dos silos de matéria prima até aos moinhos e destes até ao sistema de queima) e a moagem do cru. Em 1994, a Secil-Outão substituiu a quase totalidade dos transportadores pneumáticos por transportadores mecânicos (caleiras porosas e elevadores de alcatruzes) e os ventiladores existentes (as pás rectas foram substituídas por pás curvas). Estas alterações permitiram uma redução de cerca de 10% do consumo específico de energia eléctrica, o equivalente a uma redução do consumo médio de electricidade de cerca de 10,000 MWh/ano (Projecto SIURE, 1998). Assim, como os equipamentos utilizados a nível de transporte de matéria prima e cru são os considerados BAT, não se considera a hipótese de alterações a este nível.

Para a moagem de cru são utilizados moinhos de mós verticais com separadores dinâmicos, que vieram substituir os anteriores moinhos de cru horizontais, com reduções significativas nos consumos de energia eléctrica (Projecto SIURE, 1998). Actualmente este tipo de moinho é a técnica menos consumidora de energia para a moagem de matérias primas (ver Quadro 9, Capítulo 5). Também não se considera a hipótese de alteração a este nível.

7.2.1.2 Sistema de Queima

Os sistemas de queima da fábrica do Outão são constituídos por um forno rotativo com ciclone pré-aquecedor de 4 estágios e arrefecedor planetário para o clínquer. A pesquisa bibliográfica efectuada evidencia que esta não é a técnica aplicada nas novas instalações de fabrico de clínquer, sendo actualmente mais comuns os sistemas com pré-aquecedores de 5 a 6 estágios e pré-calcinador, com arrefecedor de grades para o clínquer (Cembureau, 1999).

Assim, vai considerar-se a instalação de um pré-calcinador e de um ciclone adicional e também a substituição do arrefecedor planetário por um arrefecedor de grades. No Quadro 23 são sintetizadas as estimativas de custos apresentadas nos estudos de Martin (Martin, 1999) e de De Beer (De Beer, 2001) respeitantes à instalação de pré-calcinador e ciclone, baseadas no desempenho de uma instalação fabril em Itália que sofreu estas alterações.

Quadro 23 – Estimativas de custos das alterações ao sistema de queima

ALTERAÇÃO	Investimento		Operação e Manutenção	
	Martin, 1999	de Beer, 2001	Martin, 1999	de Beer, 2001
Instalação de pré-calcinador e um ciclone extra	10 €/t cap. clínquer	18.5 €/t cap. clínquer	1 €/t cap. clínquer	-2.5 € / GJ poup. anualmente
Substituição de arrefecedor planetário por arrefecedor de grades	0.4-0.5 €/t cap. clínquer	2 €/t cap. clínquer	0.1 €/t cap. clínquer	-

Como custos de investimento, operação e manutenção serão considerados os estimados pelo estudo de De Beer por ser um estudo feito para a UE, enquanto o estudo de Martin foi feito para os EUA. Assim, os custos de aquisição de um pré-calcinador e um ciclone extra serão na ordem dos 18.5 Euros por tonelada de capacidade de clínquer. Não é possível calcular o valor global do investimento, porque as alterações introduzidas no sistema de queima, além de melhorarem a eficiência energética, aumentam também e significativamente a capacidade de produção.

Os estudos já citados e um estudo do Cembureau (Cembureau, 1999) apresentam também estimativas relativas à alteração dos consumos de energia provocadas pelas alterações seleccionadas; o Quadro 24 sintetiza esses valores. Uma chamada de atenção para o facto das

estimativas de Martin e de De Beer serem dadas em termos de alteração dos consumos, ou seja, em termos das reduções/aumentos de consumo, e as estimativas dadas pelo Cembureau serem dadas em termos absolutos, ou seja, novos consumos.

Quadro 24 – Estimativas de alterações/novos consumos

ALTERAÇÃO	Martin, 1999	de Beer, 2001	Cembureau, 1999
	Variação no consumo		Consumo total
Instalação de pré-calcinador e um ciclone extra	- 0.4 GJ/t clínquer	- 10% a - 14% do consumo de energia	2900-3200 MJ/t clínquer 6.0 kWh/ t clínquer
Substituição de arrefecedor planetário por arrefecedor de grades	+3 kWh/t clínquer -8% combustível	- 0.04 a - 0.15 GJ/t clínquer	4.0 - 8.0 kWh/t clínquer

Para poder efectuar a comparação entre a situação actual e situação resultante das alterações começa por calcular-se os custos com a energia verificados na SECIL no ano 2000, que são apresentados no Quadro 25. Os cálculos auxiliares, nomeadamente os referentes ao preço médio do combustível, são apresentados no Anexo 4.

Quadro 25 – Estimativa dos custos com a energia verificados no ano 2000

	Consumo Específico	Preço médio da energia	Custos
Energia Eléctrica	29.4 kWh/t clínquer	0.075 €/kWh	2.21 €/t clínquer
Energia Térmica	3379 MJ/t clínquer	0.0025 €/MJ	8.5 €/t clínquer
		CUSTO TOTAL	10.71 €/t clínquer

Relativamente às alterações referentes aos consumos energéticos são calculados os novos consumos e custos para as três estimativas disponíveis. No Quadro 26, são apresentadas as alterações nos consumos de energia aplicando as estimativas de Martin e De Beer.

O Quadro 27 apresenta para a Secil o consumo actual e os consumos que se iriam obter, segundo cada estimativa, depois de introduzidas as alterações no sistema de queima.

Quadro 26 – Alteração dos consumos de energia

ALTERAÇÃO	Martin, 1999		de Beer, 2001	
	Combustível	Electricidade	Combustível	Electricidade
Instalação de pré-calcinador e um ciclone extra (1)	- 400 MJ/t clínquer	-	- 338 a - 473 MJ/t clínquer	-
Substituição de arrefecedor planetário por arrefecedor de grades (2)	- 270 MJ/t clínquer	+ 3 kWh/t clínquer	- 40 a - 150 MJ/t clínquer	-
Alteração total (1) + (2)	- 670 MJ/t clínquer	+ 3 kWh/t clínquer	- 378 a - 623 MJ/t clínquer	-

Quadro 27 – Consumos actuais de energia e consumos previstos

		Novos consumos segundo....		
		Martin, 1999	De Beer, 2001	Cembureau, 1999
Combustível (MJ/t clínquer)	3379	2709	2756 a 3001	2900 a 3200
Electricidade (kWh/t clínquer)	29.4	32.4	-	10 a 14

Merece também lembrar o facto de que os consumos de electricidade previstos pelo Cembureau não são directamente comparáveis com os restantes por não considerarem os sistemas de transporte. Utilizando os custos com energia calculados para o ano 2000 no Quadro 25 foram calculados os novos custos com a energia para as três estimativas. O Quadro 28, apresenta estes custos e também os actuais, para permitir uma comparação mais fácil. Como não é possível determinar o aumento de capacidade de produção de clínquer, não é possível calcular o valor dos ganhos em termos absolutos.

Quadro 28 – Custos actuais e novos custos com a energia

	Actual (2000)	Martin, 1999	de Beer, 2001	Cembureau, 1999
Energia Eléctrica (€/t clínquer)	2.21	2.44	-	0.75 a 1.06
Energia Térmica (€/t clínquer)	8.5	6.82	6.94 a 7.55	7.30 a 8.06
TOTAL (€/t clínquer)	10.71	9.26	6.94 a 7.55	8.05 a 9.12

Analisando o Quadro 28 é possível verificar reduções, que variam entre 13.5% e 35%, nos custos com a energia para as três estimativas calculadas, apesar dos custos com a energia eléctrica aumentarem cerca de 10% (aplicando as estimativas apresentadas por Martin). Quanto aos custos com a energia térmica, as reduções calculadas variam entre os 5% e os 20%.

7.2.1.3 Moagem de Cimento

Na fábrica do Outão, a moagem do cimento é feita através de moinhos tubulares com corpos moentes. Actualmente, a prensa de rolos é considerada a melhor técnica disponível para efectuar essa operação. Vai então considerar-se a substituição do actual moinho por uma prensa de rolos. Será necessário estimar os consumos para cada um dos equipamentos de moagem, uma vez que o consumo específico de electricidade actual também não é conhecido. O Quadro 29 sintetiza a informação recolhida em dois estudos já mencionados (Martin, 1999 e Cembureau, 1999).

Quadro 29 – Consumos e custos para os dois sistemas de moagem de cimento

Sistema de Moagem	Cembureau, 1999	Martin, 1999	
	Consumo Específico	Consumo específico	Custo investimento
Moinho tubular com corpos moentes e sistema fechado	36.5 (kWh/t cimento)	33 a 45 (kWh/t cimento)	-
Prensa de rolos	24.5 (kWh/t cimento)	22 a 33 (kWh/t cimento)	4 €/t

Aplicando os custos apresentados no Quadro 25 foram calcular-se os custos com a electricidade para cada sistema de moagem, utilizando as estimativas fornecidas pelo Cembureau e por Martin e os custos de investimento utilizando as estimativas de Martin. Nos cálculos supôs-se que a produção de cimento se mantém. Os resultados são apresentados no Quadro 30.

Quadro 30 – Custos com electricidade para os dois sistemas de moagem

Sistema de Moagem	Cembureau		Martin, 1999		Investimento	
	Custos c/ a electricidade		Custos c/ a electricidade			
	€/t cimento	Milhares de €	€/t cimento	Milhares de €	€/t cimento	Milhares de €
Moinho tubular com corpos moentes e sistema fechado	2.75	6113	2.48 a 3.39	5513 a 7536	-	-
Prensa de rolos	1.84	4090	1.66 a 2.48	3690 a 5513	3.99	8870

Assim, um investimento de quase 9 milhões de Euros poderia ser compensado por reduções até 33% no consumo de electricidade.

7.2.2 Impactos Ambientais

As emissões dos principais poluentes encontram-se, como foi visto na secção 7.1.5, abaixo dos limites estabelecidos na legislação portuguesa, para o que contribuíram com certeza as melhorias introduzidas no processo de queima e os sistemas de despoeiramento.

No entanto, é importante considerar medidas de redução das emissões dada a importância dos poluentes em causa e a possibilidade de diminuição dos limites máximos de emissão.

7.2.2.1 Dióxido de Carbono

Como já foi dito, as técnicas disponíveis para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa podem ser divididas em duas grandes categorias: as técnicas relacionadas com a energia e as não relacionadas com a energia. Assim, as técnicas, e respectivos investimentos, destinadas a diminuir o consumo de energia serão também eficazes na redução das emissões de CO₂ relacionadas com o uso de energia. As emissões de CO₂ actuais na fábrica do Outão, calculadas na secção 7.1.5.2., são apresentadas no Quadro 31.

Quadro 31 – Estimativa das emissões de CO₂ no Outão, no ano 2000

Emissões resultantes da queima do combustível (1000 t CO ₂)	Emissões resultantes da electricidade (1000 t CO ₂)	Emissões resultantes do processo (1000 t CO ₂)	Emissões totais (1000 t CO ₂)
601	123	911	1635

Foram então calcular-se os efeitos nas emissões de CO₂ das medidas de redução de consumo específico de energia através das alterações ao sistema de queima, apresentadas na secção 7.2.1.2. Seguiu-se a metodologia de cálculo já descrita na secção 7.1.5.2 e as estimativas de alteração do consumo de energia, eléctrica e térmica, calculadas no Quadro 27. As novas emissões e correspondentes percentagens de redução em relação às emissões actuais são apresentadas no Quadro 32. Nos cálculos, apresentados no Anexo 5, assumiu-se que as emissões de CO₂ resultantes do processo de transformação da matéria prima não sofrem alterações.


Quadro 32 – Redução das emissões de CO₂ resultantes de alterações ao sistema de queima

	Emissões resultantes da queima do combustível		Emissões resultantes do uso de electricidade		Emissões totais (incluindo processo)	
	Emissão de CO ₂ (1000t)	% redução	Emissão de CO ₂ (1000t)	% redução	Emissão de CO ₂ (1000t)	% redução
de Beer, 2001	492 – 535	11.0 - 18.1	119	3.2	1523-1565	4.3 - 6.8
Cembureau, 1999	518 – 570	5.2 - 13.8	118	4.0	1547 - 1599	2.2 - 5.4
Martin, 1999	484	19.5	114 – 123	0 - 7.3	1510 - 1518	7.2 - 7.6

Como seria de esperar, verifica-se que as alterações introduzidas no sistema de queima são também eficientes na redução das emissões de CO₂. As reduções das emissões relacionadas com a queima do combustível podem atingir os 20% e as reduções com a electricidade os 4%.

As reduções nas emissões totais não atingem os 8%, isto porque as emissões de CO₂ libertadas durante o processo de transformação da matéria prima são bastante significativas e não são influenciadas por medidas de aumento da eficiência energética. Uma das soluções mais eficazes para se reduzir este tipo de emissões é a diminuição do teor de clínquer no cimento, aumentando a percentagem de aditivos. O potencial médio global de redução das emissões de CO₂ através da produção de cimentos compostos está estimado em 22% (Worrel, 1998) e pode ser feito em alguns casos sem incorrer em custos adicionais significativos (OCDE, 2000). Os custos dos materiais a misturar com o clínquer dependem fortemente dos custos de transporte, e podem variar entre 15 e 30 €/t para as cinzas volantes e aproximadamente 24 €/t para as escórias; no entanto, estes custos são consideravelmente inferiores aos custos de produção de clínquer (Worrel, 1998).

Foi então calcular-se as emissões de CO₂, relacionadas com o processo, da fábrica do Outão para diferentes rácios clínquer/cimento, tendo como base a produção de cimento verificada no ano 2000 (2.23 milhões de toneladas). Os cálculos seguiram a mesma metodologia descrita na secção 7.1.5.2; o Quadro 33, mostra os resultados.

Quadro 33 – Variação das emissões de CO₂ do processo com o rácio clínquer/cimento


Rácio clínquer/cimento (t/t)	Clínquer (1000t)	CO ₂ (t)	Redução das emissões de CO ₂ do processo (%)
0.81 (actual)	1645	910752	-
0.75	1667	845462	7.2
0.70	1556	789098	13.4
0.65	1445	732734	19.5
0.60	1334	676370	25.7
0.55	1223	620006	31.9

Analisando os resultados obtidos confirma-se que uma redução do rácio clínquer/cimento é bastante eficaz na redução das emissões de CO₂.

7.2.2.2 Óxidos de Azoto

A Secil-Outão possui um sistema de monitorização e controle computadorizado e instalou novos queimadores, o que além de outros benefícios poderá ter reduzido as emissões de NO_x. Assim, as medidas de redução primárias enumeradas no Capítulo 5 estão já implementadas, à excepção da combustão por estágios. No entanto, esta medida só é aplicável a instalações que possuam pré-calcinador e arrefecedor de grades, o que não acontece no Outão.

A redução não-catalítica selectiva, através da injeção de amónia na corrente gasosa é uma técnica que poderá ser introduzida no Outão, caso seja necessário reduzir as emissões de NO_x devido a alterações da legislação. É uma técnica que tem sido implementada noutros países da Europa com sucesso, permitindo atingir reduções de NO_x até 65%. Os seus custos são ainda relativamente elevados, exigindo um investimento que pode ir de 500 mil a 1,5 milhões de Euros.

7.2.3 Co-Incineração

A Secil-Outão, juntamente com a cimenteira da Cimpor em Souselas, foi seleccionada pela Comissão Científica Independente de Controlo e Fiscalização Ambiental da Co-Incineração como sendo uma instalação adequada à queima de resíduos industriais perigosos (RIP). Para tal valeu a sua consideração como “uma das melhores unidades cimenteiras portuguesas” e sua certificação pelas normas ISO 9001 e ISO 14000. O Outão foi considerado como estando em

“condições tecnológicas de incorporar rapidamente os melhores processos em curso a nível de cimenteiras europeias no processo de co-incineração no nosso país” (CCI, 2000).

7.2.3.1 Aspectos Económicos

O investimento total para a implementação da co-incineração está estimado em cerca 18.5 milhões de Euros, considerando a queima de 100,000 toneladas de RIP em duas instalações cimenteiras (Seia, 1998). Este valor corresponde a:

- Estação de tratamento de RIP: 7.47 milhões de €
- Estação de transferência: 0.3 milhões de €
- Sistemas de recepção e alimentação nas duas cimenteiras: 4.74 milhões de €
- Sistemas de filtros de mangas nas duas cimenteiras: 5.98 milhões de €.

Assim, os investimentos a efectuar especificamente na fábrica do Outão ascenderão aos 2.37 milhões de Euros para os sistemas de recepção e alimentação (o que inclui depósitos para os vários tipos de resíduos, unidades de injeção e controlo do processo) e 2.99 milhões de Euros para os filtros de mangas, o que totaliza 5.36 milhões de Euros.

A co-incineração de RIP é considerada um serviço prestado pela indústria cimenteira às indústrias, e ao próprio país, através da eliminação de resíduos indesejados; como tal, está previsto um preço médio pelo tratamento de resíduos que rondará os 149.6 Euros por tonelada de resíduo tratado (Seia, 1998). Estando prevista no Outão, a co-incineração de cerca de 50 000 toneladas de RIP por ano, o valor pago ascenderá a 7.48 milhões de Euros por ano. Os custos de operação foram estimados em 12 € por tonelada processada, incluindo os custos de mistura e controlo (J.P. Degré, 1996). Num ano, os custos de operação ascenderão a 600 mil Euros.

A implementação da co-incineração na Secil-Outão (e também na Cimpor de Souselas) irá trazer vantagens importantes a esta empresa, uma vez que lhe permitirá operar com um combustível pelo qual receberá dinheiro. Este factor irá possibilitar uma maior competitividade interna e externa da cimenteira, o que trará em contrapartida a possibilidade de lhe ser exigida a aplicação de novas técnicas de tratamento e controlo dos efluentes que estão constantemente a ser desenvolvidas.

7.2.3.2 Aspectos Energéticos

A queima de RIP irá substituir parte do carvão utilizado como combustível nos fornos da cimenteira, sendo por isso importante calcular as poupanças obtidas ao nível deste combustível.

Um requisito energético que o combustível preparado para a co-incineração em cimenteiras tem de satisfazer é o de ter uma capacidade calorífica média de 15 MJ/kg, em que cerca de 20% dos resíduos com uma capacidade calorífica de 25 MJ/kg; se assim não for o processo de co-incineração será bastante instável (CCI, 2000).

Assim, vai considerar-se a queima de 50 000 toneladas de RIP por ano com um poder calorífico médio de 15 MJ/kg (o mínimo exigido). A energia fornecida pelos resíduos, determinada pela aplicação da equação [3], atinge cerca de 750000 GJ por ano :

$$\text{Energia}_{\text{RIPs}} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{ano}} \right] = \text{PoderCalorífico}_{\text{RIPs}} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{t}} \right] * \text{RIPs} \left[\frac{\text{t}}{\text{ano}} \right] \quad [3]$$

No ano 2000 consumiram-se no Outão 6 078 840 GJ de carvão e fuelóleo, pelo que a energia térmica poupada pela co-incineração corresponde a cerca de 12% da energia térmica total consumida.

Em termos do combustível, considerando um poder calorífico médio do carvão/coque de 30 MJ/kg e aplicando a equação [4] verifica-se que esta energia corresponderia a 25 000 toneladas de carvão:

$$\text{Carvão} \left[\frac{\text{t}}{\text{ano}} \right] = \text{Energia}_{\text{RIPs}} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{ano}} \right] / \text{PoderCalorífico}_{\text{carvão}} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{t}} \right] \quad [4]$$

Este valor corresponde a cerca de 13% do carvão total consumido no Outão no ano 2000 (197000 toneladas). Considerando o custo da tonelada de carvão 60 Euros (Cembureau, 1999), a poupança ascenderá a mais de 1.5 milhões de Euros por ano.

7.2.3.3 Efeitos nas Emissões de Poluentes

Os aspectos referentes às emissões de poluentes foram já abordados no capítulo 5, secção 5.3.2., e aplicam-se na generalidade ao caso da fábrica do Outão. No entanto, é importante referir que a fábrica do Outão está inserida na Reserva Natural do Estuário do Rio Sado e no Parque Natural da Arrábida. Apesar do Estudo de Impacte Ambiental realizado em 1998 (Seia, 1998) não

prever impactes ambientais significativos na qualidade da água, no solo, no ruído, na paisagem ou no património, e as concentrações de poluentes se manterem afastadas dos limites da legislação, desconhece-se ainda o impacto dos metais pesados e nas dioxinas na flora e fauna, ainda que dentro dos limites estipulados pela legislação (Seia, 1998). Assim, será necessário um programa de monitorização ambiental rigoroso para acautelar possíveis impactes negativos.

7.2.3.4 Efeito nas Emissões de CO₂

Já foi visto que a queima dos RIP irá permitir a poupança de 25 000 toneladas de carvão por ano, ou seja 750,000 GJ. Aplicando a equação [5] calculou-se que estes valores correspondem a 74,800 toneladas de CO₂:

$$\text{CO}_2 \left[\frac{\text{t}}{\text{ano}} \right] = \text{Energia} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{ano}} \right] * \text{F.E.}_{\text{carvão}} \left[\frac{\text{t}_c}{\text{GJ}} \right] * \frac{44}{12} \left[\frac{\text{t}_{\text{CO}_2}}{\text{t}_c} \right] \quad [5]$$

Este valor equivale a cerca de 13% das emissões de CO₂ resultantes da queima de carvão e/ou coque (cerca de 600 mil toneladas), e cerca de 4% das emissões totais de CO₂ resultantes do fabrico do cimento (1.635 milhões de toneladas).

Importa também considerar as emissões de CO₂ resultante da queima dos RIP. Esta não é uma questão simples, pois é necessário comparar a queima dos resíduos na cimenteira com o destino alternativo que lhes seria dado se para ali não fossem destinados. As alternativas mais comuns à queima de resíduos em cimenteiras são a incineração dedicada, com ou sem recuperação de energia, e a deposição em aterro.

É óbvio que a incineração de resíduos gera CO₂, mas a extensão da sua contribuição para o efeito de estufa e a consideração ou não dos resíduos como fonte de energia renovável é um assunto polémico. Considere-se, por exemplo, a opção por deposição dos resíduos em aterros versus a sua incineração/co-incineração. Se os resíduos a queimar fossem depositados em aterros, a sua decomposição daria origem á formação de metano (CH₄) um gás com um potencial de efeito de estufa muito superior ao do CO₂; a maior parte dos aterros não possui recuperação e aproveitamento do metano, e os que o fazem têm uma taxa de recuperação relativamente baixa. Esta situação tem, no entanto, de ser vista com cuidado, porque existem já hoje aproveitamentos eficientes de CH₄.

A comparação entre incineração dedicada e co-incineração envolve vários aspectos de ordem económica, energética e ambiental, e os estudos consultados parecem sugerir que nenhuma das técnicas tem claros benefícios e/ou desvantagens em relação à outra (CCI, 2000).

Por outro lado, a produção de resíduos pode ser minorada (através da reciclagem, por exemplo) mas nunca poderá ser eliminada por completo, isto é, os resíduos poderão ser vistos como uma fonte de energia renovável. Assim, apesar da grande fracção não biodegradável dos RIP estes irão sempre substituir combustíveis fósseis, pelo que alguns estudos consideram que as emissões de CO₂ não deverão ser contabilizadas como contribuindo para o efeito de estufa global (IPTTS, 1999). No entanto esta perspectiva é simplista e tem ser analisada cuidadosamente.

A questão central parece ser a seguinte: se os RIP forem co-incinerados em cimenteiras irão substituir parte do carvão, evitar emissões de CO₂ provenientes da queima deste combustível e emitir CO₂ como resultado da sua combustão; se os RIP forem incinerados em incineradoras dedicadas com produção de energia eléctrica irão evitar as emissões de CO₂ resultantes da produção de energia eléctrica pelos métodos convencionais (grande parte a partir da queima de carvão, o mesmo combustível usado nas cimenteiras) e emitir CO₂ como resultado da sua combustão. Para saber qual dos processos resultará em menores emissões de CO₂ é necessário um estudo exaustivo que inclua eficiências de queima, eficiências de produção de electricidade e eficiências térmicas.

Assim, o que se pode afirmar é que a co-incineração de RIP em cimenteiras não alterará significativamente as emissões de CO₂ nas cimenteiras, mas poderá reduzir as emissões de CO₂ a nível nacional. Esta redução nunca será no entanto significativa na produção de CO₂ da economia portuguesa (ou de qualquer outra), dadas as grandezas envolvidas.

8. CONCLUSÃO

O presente trabalho começou por caracterizar o sector cimenteiro nacional, inserindo-o num contexto global e analisando as principais etapas do processo de produção de cimento. A produção de cimento em Portugal duplicou entre 1974 e o ano 2000, tendo vindo, no entanto, a partir de 1997 a apresentar uma tendência para estabilizar, o que já aconteceu na grande maioria dos países da UE e na generalidade dos países desenvolvidos. O consumo de cimento per capita (~950 kg per capita) continua a ser dos mais elevados da Europa, mas com tendência a aproximar-se dos valores médios europeus.

No que respeita aos consumos de energia, o sector cimenteiro é um dos sectores da economia portuguesa que mais energia consome, em especial carvão e coque de petróleo. É também um dos sectores com maior intensidade energética, uma vez que o cimento é um produto de reduzido preço unitário.

Na primeira parte do trabalho foram identificados os sistemas maiores consumidores de energia térmica – o sistema de queima (ou forno) – e de energia eléctrica – os sistemas de transporte, ventilação e moagem. Foram também analisadas as evoluções tecnológicas que resultaram numa redução de 50%, entre 1974 e 1995, dos consumos específicos de energia, ou seja, consumo de energia por unidade de produto. Esta melhoria foi resultado da conversão do processo de fabrico húmido para o processo seco, da introdução de melhorias nos sistemas de queima, como a implementação das torres de ciclones, e de alterações aos sistemas de transporte, ventilação e moagem.

No que respeita aos impactes ambientais, os problemas relativos às emissões de partículas parecem estar resolvidos, isto é, existem já mecanismos de controle adequados com eficiências de remoção elevadas, apesar dos custos serem ainda elevados. As emissões de CO₂ são muito significativas, sendo cerca de 60% resultantes do processo de calcinação da matéria prima que ocorre nos fornos cimenteiros. Assim, para diminuir este tipo de emissões é necessária uma nova abordagem e diferentes tipos de medidas que passam pelo aumento da produção de cimentos compostos (com menor incorporação de clínquer e maior de aditivos naturais ou industriais), pelo desenvolvimento dos polímeros minerais e por maior investigação em técnicas de remoção do CO₂ dos gases de exaustão dos fornos. Os dois primeiros tipos de medidas

mencionados são também eficazes na redução do consumo de recursos naturais, uma área em que a produção de cimento tem grande impacto através da exploração das pedreiras. Para o controle das emissões de NO_x, a tecnologia de remoção não-catalítica selectiva é actualmente considerada a mais promissora e a sua implementação na indústria cimenteira nacional está a ser estudada, tendo-se já procedido a alguns ensaios.

Das tecnologias disponíveis, as mais eficientes (BAT) para três passos vitais na produção de cimento e no consumo de energia são:

- Preparação das matérias primas: moinhos verticais;
- Queima de clínquer: forno circular rotativo com pré-calcinador, pré-aquecedor de 4 a 6 estágios de ciclones e arrefecedor de grades;
- Moagem de cimento: prensas de rolos.

A análise à cimenteira Secil-Outão permitiu concluir que esta indústria cimenteira tem um dos melhores desempenhos energéticos da UE, apresentando ainda uma margem de melhoria significativa no que respeita ao consumo específico de energia térmica e à redução dos impactes ambientais.

A escolha das BATs a introduzir na fábrica Secil-Outão teve em atenção os consumos energéticos, os impactes ambientais e os custos de investimento e operação. Concluiu-se que o maior potencial de poupança de energia se encontra no sistema de queima, onde o actual consumo específico de energia térmica é quase 20% superior à melhor prática actual. A implementação da BAT implicaria custos de investimento elevados (10 Euros por tonelada de capacidade de produção de clínquer), mas resultaria numa redução significativa (cerca de 35%) dos custos com energia por unidade de produto. Uma segunda intervenção com vista a diminuir o consumo específico de energia situa-se na área da moagem do cimento, com a introdução de prensas de rolos, embora as reduções de consumo com esta medida sejam bastante inferiores às obtidas com a intervenção anterior.

No que respeita às BATs ambientais, a implementação da redução não-catalítica selectiva é uma forte possibilidade que se coloca à Secil-Outão, e restantes cimenteiras portuguesas, para a redução das emissões de NO_x. As emissões de CO₂ poderão ser reduzidas em cerca de 20% como efeito secundário da implementação de medidas de eficiência energética. No

entanto, para reduzir a contribuição das cimenteiras para o efeito de estufa será necessário proceder ao aumento da produção de cimentos compostos e incorporação de sub-produtos de outros processos industriais. No entanto, a implementação destas medidas enfrenta ainda algumas barreiras, em especial a indisponibilidade de aditivos e os códigos de construção. Medidas como o aumento do uso de cimentos compostos terão também efeitos benéficos na redução do consumo de recursos naturais. No entanto, a exploração das pedreiras será sempre inevitável na a produção de cimento e por isso as medidas de recuperação paisagística e minimização de impactes deverão ser sempre tidas em conta independentemente das alterações introduzidas no processo de fabrico.

BIBLIOGRAFIA

Borgholm, H.E., Herfort, D. e Rasmussen, S. (1995), A new blended cement based in mineralised clinker, *World Cement Research and Development*, Agosto 1995.

Bouça, J. e Godinho, C. (2001), *A Energia na Indústria*, Lisboa: Gabinete de Estudos e Prospectiva Económica do Ministério da Economia.
em <http://www.gepe.pt>

Brugan, J.M. e Taha, M. (1999), Southern Province – Meeting Expectations, *World Cement Magazine*, January 1999.

Capros, P., Kouvaritakis, N. e Mantzos, L. (2001), *Top-Down Analysis of Greenhouse Gas Emission Reduction Possibilities in the E.U. – Final Report*, Greece: DG Environment
em <http://europa.eu.int/comm/environment/enveco>

Cembureau (1997), *Alternative Fuels in Cement Manufacture*, Bruxelas: Cembureau.

Cembureau (1998), *Climate Change, Cement and the E.U.*, Bruxelas: Cembureau.

Cembureau (1999), *“Best Available Techniques” for the Cement Industry*, Bruxelas: Cembureau.

Cembureau (2001), *Anual Report 2000*, Bruxelas: Cembureau.

Cimpor (1987), *Queima de Pneus Usados no Centro de Produção de Maceira-Liz*, Lisboa: Cimpor.

Cimpor (2000), *Relatório Ambiental, 1999*, Lisboa: Cimpor

Cimpor (2001a), *Relatório e Contas 2000*, Lisboa: Cimpor.

Cimpor (2001b), *Relatório Ambiental, 2000*, Lisboa: Cimpor.

Cimpor e Secil (1993), *A Contribuição da Indústria Cimenteira para a Protecção do Ambiente*, Lisboa: Cimpor e Secil.

CleanTechIndia, Survey of Industrial Environment Report on Cement Industry
em <http://cleantechindia.com/cti/cement-ch.htm>

Comissão Científica Independente de Controlo e Fiscalização Ambiental da Co-Incinação
(2000), *Parecer Relativo ao Tratamento de Resíduos Industriais Perigosos*, Aveiro: Principia.

Comissão Europeia (2000), *Empleo de Residuos Industriales como Combustibles Alternativos en la Industria del Cemento*, Madrid: IDAE.

Cruz, O.(1998), A Co – Incineração na Indústria Cimenteira, em: *Indústria e Ambiente*, 12, pp. 4-12.

DCEA-FCT (2000), *Emissão e Controlo de Gases com Efeito de Estufa em Portugal*,
Universidade Nova de Lisboa

Em: <http://www.gasa3.dcea.fct.unl.pt/gee/25feb/documentos.html>

Decreto-Lei 58/82 de 26 de Fevereiro

Decreto-Lei 89/90 de 16 de Março

Decreto-Lei 162/90 de 22 de Maio

Decreto-Lei 352/90 de 9 de Novembro

Decreto-Lei 194/2000 de 21 de Agosto

De Beer, J., Phylipsen, D. e Bates, J.(2001), *Economic Evaluation of Carbon Dioxide and Nitrous Oxide Emission Reductions in Industry in the E.U, Bottom-Up Aanalysis – Final Report*, Netherlands: DG Environment
em <http://europa.eu.int/comm/environment/enveco>

Degré, J.P. (1996), *Waste Co-Processing in Industry – Criterias for an Optimal Waste Management in the Cement Industry*, Holderbank Corporate Industrial (Documento Interno).

Despacho DGE de 29 de Abril de 1983

DGE (1971 a 1998), *Balanços Energéticos*, Lisboa: DGE

DGE (1998), *Informação Energia nos. 22/23*, Lisboa: DGE

DGQA - Direcção Geral da Qualidade do Ambiente (1989), *Emissões Atmosféricas na Indústria do Cimento – Situação Portuguesa*, Lisboa: DGQA.

Directiva 94/67/CE do Conselho, de 16 de Dezembro

Domingos, J.J. (2001), *Preços da Energia na Indústria*, Lisboa: Gabinete de Estudos e Prospectiva Económica do Ministério da Economia. Em <http://www.gepe.pt>

EIPPCB – European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (2000), *Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries*, Sevilha: EIPPCB.

F.L. Smidth (2001a), *Dry Process Kiln Systems*, Denmark: F.L. Smidth.
Em: <http://www.flsmidth.com>

F.L. Smidth (2001b), *Raw grinding Plants*, Denmark: F.L. Smidth.
Em: <http://www.flsmidth.com>

Gale, J. and Freund, P. (1999), *Greenhouse Gas Abatement in Energy Intensive Industries*, London: IEA Greenhouse Gas R&D Programme.

Greer, W.L., Johnson, M.D., Morton, E.L., Raught, E.C., Steuch, H.E. e Trusty, C.B. (1992), Portland Cement, em: Buonicore, A.J. e Davids, W. (ed.), *Air Pollution Engineering Manual*, Nova Iorque: ITP.

IMPEL (1998), *IMPEL Workshop on Licensing and Enforcement Practices in Cement Plants Using Alternative Fuels – Final Report*, Austria: IMPEL NETWORK.

IPCC (1996a), *Greenhouse Gas Inventory Workbook*, UK: IPCC.

IPCC (1996b), *Greenhouse Gas Inventory Reference Manual*, UK: IPCC.

IPTS - Institute for Prospective Technological Studies (1999), *The Incineration of Waste in Europe: Issues and Perspectives*, Sevilha: European Commission Joint Research Centre.

Martin, N., Worrel, E. e Price, L. (1999), *Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions Reduction Opportunities in the U.S. Cement Industry*, Berkeley: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

Martin, N., Worrel, E., Ruth, M. e Price, L., (2000), *Emerging Energy Efficient Industrial Technologies*, Berkeley: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

MEET Project (1998), *Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Transport – Emission Factors for Future Road Vehicles (Deliverable 26)*, Thessaloniki: Aristotle University.

Nunes, C. e Godinho, C. (2001), *Cimento – Um Sector Dinâmico*, Lisboa: Gabinete de Estudos e Prospectiva Económica do Ministério da Economia.
em <http://www.gepe.pt>

Portaria 286/93 de 12 de Março

OCDE (2000), *An Initial View on Methodologies for Emission Baselines: Cement Case Study*, Paris: OCDE.

Price, L., Worrel, E. e Phylipsen, D. (1999), *Energy Use and Carbon dioxide Emissions in Energy-Intensive Industries in Key Developing Countries*, Berkeley: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

Price, L., Worrel, E., Martin, N., Lehman, B. e Sinton, J.(2000), *China's Industrial Sector in a International Context*, Berkeley: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

Projecto Siure (1998), *Linhas VIII e IX – Projecto de Racionalização de Consumo de Energia*, DGE: PEDIP.

Reiter, B. e Stroh, R. (1995), *Use of Waste Materials in the Cement Industry*, Viena.
em: <http://www.ubavie.gv.at/publikationen/mono/m72s.htm>

Ruth, M., Worrel, E. e Price, L. (2000), *Evaluating Clean Development Mechanism Projects in the Cement Industry using a Process-Step Benchmarking Approach*, Berkeley: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

Schumacher, K. e Sathaye, J. (1999), *India's Cement Industry: Productivity, Energy Efficiency and Carbon Emissions*, Berkeley: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

SCORECO (1997a), *A Co-Incinerção de Resíduos Industriais em Fornos de Cimento – Documento Ambiental*, Lisboa: SCORECO.

SCORECO (1997b), *A Co-Incinerção de Resíduos Industriais em Fornos de Cimento – Documento Técnico*, Lisboa: SCORECO.

SCORECO (1997c), *A Co-Incinação de Resíduos Industriais em Fornos de Cimento – Documento Informativo*, Lisboa: SCORECO.

Secil (2000), *Relatório Ambiental 1999*, Lisboa: Secil.

Secil (2001a), *O Betão e o Ambiente*, Lisboa: Secil.

Secil (2001b), *A Arrábida e a Secil*, Lisboa: Secil.

Secil (2001c), *Cimento – Um pó que resiste ao tempo*, Lisboa: Secil.

SEIA (1998a), *Estudo de Impacte Ambiental do Projecto de Eliminação de Resíduos Industriais pelo Sector Cimenteiro – Resumo Não Técnico*, Lisboa: SCORECO.

SEIA (1998b), *Estudo de Impacte Ambiental do Projecto de Eliminação de Resíduos Industriais pelo Sector Cimenteiro – Tomo VI*, Lisboa: SCORECO.

Thomsen, K. e Rosholm, P. (1993), Reducing Nox Emissions, em: *II Coloquios de Directores y Technicos de Fabricas de Cimento*, Barcelona.

USEPA - Environmental Protection Agency (1994), *Emission Factor Documentation – Portland Cement Manufacturing*, NC: US EPA.

USEPA - Environmental Protection Agency (2000), *NOx Control Technologies for the Cement Industry*, NC: US EPA.

Wehr, R. (1999), Roller Mill Successes of the 1990's, *International Cement Review Magazine*, April 1999.

Worrel, E., Hendriks, C.A., Price, L., Martin, N., Meida, L.O., Jager, D. e Riemer, P. (1998), Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry, em: *Fourth International Conference in Greenhouse Gas Control Technologies*.

Sites Consultados na Internet:

www.cembureau.be

www.cement.org.au

www.cimpor.pt

www.energyefficiency-cii.com/energy1.html

www.secil.pt

www.ub.es/medame/indcemen.html

ANEXOS

ANEXO 1

Cálculo dos consumos específicos de energia nas cimenteiras portuguesas

O consumo específico de energia nas cimenteiras portuguesas foi calculado através das equações abaixo indicadas, com bases nos valores de consumos e produção de cimento (Balanços Energéticos 1971 a 1998, dados fornecidos por Cimpor e Secil):

$$CE_{e.térmica} = \frac{C_{e.térmica}}{P_{cimento}}$$

$$CE_{e.eléctrica} = \frac{C_{e.eléctrica}}{P_{cimento}}$$

com,

C.E. e. térmica – consumo específico de energia térmica

C.E. e. eléctrica – consumo específico de energia eléctrica

C e. térmica – consumo de energia térmica

C e. eléctrica – consumo de energia eléctrica

P cimento – produção nacional de cimento

A tabela de cálculo é a seguinte:

Ano	Cimento (1000 t)	Consumo E. Térmica (tep)	Consumo E. Eléctrica (tep)	C.E. de e. térmica (tep/1000t cimento)	C.E. de e. eléctrica (tep/1000t cimento)
1974	3362	487850	39967	145,09	11,89
1977	4361	553103	49706	126,83	11,40
1980	5771	621767	65915	107,74	11,42
1983	5984	580110	72788	96,94	12,16
1990	6988	538833	109714	77,11	15,70
1991	7470	570043	110559	76,31	14,80
1992	7640	526504	108807	68,91	14,24
1993	7617	509039	107840	66,83	14,16
1994	7977	526868	86805	66,05	10,88
1995	8123	548923	79518	67,58	9,79
1996	8455	628379	83699	74,32	9,90
1997	9276	601952	82302	64,89	8,87
1998	9615	719812	97610	74,86	10,15

ANEXO 2

Cálculo das emissões de CO₂ resultantes da produção nacional de cimento

As emissões de CO₂ resultantes da produção nacional de cimento são calculadas usando a metodologia proposta pelo IPCC (IPCC, 1996a e IPCC, 1996b).

▪ Emissões resultantes da calcinação da matéria prima

As emissões de CO₂ resultantes do processo de calcinação da matéria prima são calculadas a partir da equação abaixo indicada:

$$E_{CO_2, processo} \left[\frac{t_{CO_2}}{ano} \right] = P_{cimento} [t_{cimento}] * FE_{cimento 85\% clinker} \left[\frac{t_{CO_2}}{t_{cimento}} \right]$$

com:

$E_{CO_2, processo}$ – emissões anuais de CO₂ resultantes da calcinação da matéria prima

$P_{cimento}$ – produção anual de cimento

$FE_{cimento com 85\% clinker}$ – factor de emissão de CO₂ do cimento com 85% de clínquer

$F.E._{cimento com 95\% clinker} = 0.4985 [t_{CO_2}/t_{cimento}]$ (IPCC, 1996a)

$F.E._{cimento com 85\% clinker} = 0.4460 [t_{CO_2}/t_{cimento}]$ (estimado)

A tabela de cálculo é a seguinte:

Ano	Cimento (t)	Emissões CO ₂ , processo (tCO ₂)
1990	6987873	3116591
1991	7470000	3331620
1992	7640000	3407440
1993	7617000	3397182
1994	7977000	3557742
1995	8123000	3622858
1996	8455000	3770930
1997	9275797	4137005
1998	9614860	4288228
1999	9985642	4453596
2000	10159444	4531112

▪ Emissões resultantes da queima de combustível

As emissões de CO₂ resultantes da queima de combustível são calculadas a partir das equações abaixo indicadas:

$$E_{CO_2 combustão} \left[\frac{t_{CO_2}}{ano} \right] = E_{CO_2 carvão} + E_{CO_2 coque} + E_{CO_2 fuelóleo}$$

$$E_{CO2,carvão} \left[\frac{t_{CO2}}{ano} \right] = C_{carvão} \left[\frac{tep}{ano} \right] * 0.041868 \left[\frac{TJ}{tep} \right] * FE_{carvão} \left[\frac{t_C}{TJ} \right] * \frac{44}{12} \left[\frac{t_{CO2}}{t_C} \right]$$

$$E_{CO2,coque} \left[\frac{t_{CO2}}{ano} \right] = C_{coque} \left[\frac{tep}{ano} \right] * 0.041868 \left[\frac{TJ}{tep} \right] * FE_{coque} \left[\frac{t_C}{TJ} \right] * \frac{44}{12} \left[\frac{t_{CO2}}{t_C} \right]$$

$$E_{CO2,fuelóleo} \left[\frac{t_{CO2}}{ano} \right] = C_{fuelóleo} \left[\frac{tep}{ano} \right] * 0.041868 \left[\frac{TJ}{tep} \right] * FE_{fuelóleo} \left[\frac{t_C}{TJ} \right] * \frac{44}{12} \left[\frac{t_{CO2}}{t_C} \right]$$

com:

$E_{CO2, combustão}$ – emissões anuais de CO₂ resultantes da queima de combustível

$E_{CO2,carvão}$ – emissões anuais de CO₂ resultantes da queima de carvão

$E_{CO2,coque}$ – emissões anuais de CO₂ resultantes da queima de coque de petróleo

$E_{CO2,fuelóleo}$ – emissões anuais de CO₂ resultantes da queima de fuelóleo

C – consumo anual de combustível

FE – factor de emissão de carbono do combustível

$FE_{carvão} = 26.8 [t_C/TJ]$ (IPCC, 1996a)

$FE_{coque} = 27.5 [t_C/TJ]$ (IPCC, 1996a)

$FE_{fuelóleo} = 21.1 [t_C/TJ]$ (IPCC, 1996a)

A tabela de cálculo é a seguinte:

Ano	Carvão (tep)	$E_{CO2,carvão}$ (t)	Coque (tep)	$E_{CO2,coque}$ (t)	Fuelóleo (tep)	$E_{CO2,fuelóleo}$ (t)	Emissões CO ₂ , combustão (tCO ₂)
1990	488789	2010990	-	-	23825	77174	2088163
1991	515914	2122588	-	-	27115	87831	2210419
1992	475430	1956028	-	-	21135	68460	2024488
1993	444066	1826989	-	-	19971	64690	1891679
1994	455485	1873970	-	-	26827	86898	1960867
1995	402449	1655767	74230	313376	26720	86551	2055694
1996	435062	1789945	114497	483371	30134	97610	2370925
1997	349313	1437154	188064	793948	31866	103220	2334321
1998	288736	1187926	363398	1534154	34338	111227	2833307
1999	254918	1048790	359864	1519232	9516	30833	2598855
2000	296571	1220159	470754	1987377	9506	30798	3238335

▪ Emissões resultantes da produção de energia eléctrica

As emissões de CO₂ relacionadas com o uso de electricidade são calculadas a partir da equação abaixo indicada:

$$E_{CO_2\text{electricidade}} \left[\frac{t_{CO_2}}{\text{ano}} \right] = C_{\text{electricidade}} \left[\frac{GJ}{\text{ano}} \right] * FE_{\text{electricidade}} \left[\frac{t_{CO_2}}{GJ} \right]$$

com:

$E_{CO_2\text{electricidade}}$ – emissões anuais de CO₂ resultantes da produção de electricidade

$C_{\text{electricidade}}$ – consumo anual de electricidade

$FE_{\text{electricidade}}$ – factor de emissão de CO₂ da electricidade

$$FE_{\text{electricidade}} = 0.1704 [t_{CO_2}/TJ] \quad (\text{MEET Project, 1998})$$

A tabela de cálculo é a seguinte:

Ano	Electricidade (tep)	Electricidade (GJ)	Emissões CO ₂ , electricidade (tCO ₂)
1990	109714	4593506	782733
1991	110559	4628884	788762
1992	108807	4555531	776263
1993	107840	4515045	769364
1994	86805	3634352	619294
1995	79518	3329260	567306
1996	83699	3504310	597134
1997	82302	3445820	587168
1998	97610	4086735	696380
1999	109714	4593506	782733
2000	110559	4628884	788762

▪ Emissões de CO₂ resultantes da produção nacional de cimento

As emissões de CO₂ resultantes da produção nacional de cimento são calculadas somando as contribuições da cada fonte de emissões:

$$E_{CO_2} \left[\frac{t_{CO_2}}{\text{ano}} \right] = E_{CO_2\text{processo}} + E_{CO_2\text{combustão}} + E_{CO_2\text{electricidade}}$$

Ano	Emissões CO ₂ , processo (tCO ₂)	Emissões CO ₂ , combustão (tCO ₂)	Emissões CO ₂ , electricidade (tCO ₂)	Emissões totais de CO ₂ (tCO ₂)
1990	3116591	2088163	782733	6354351
1991	3331620	2210419	788762	6722976
1992	3407440	2024488	776263	6609291
1993	3397182	1891679	769364	6458117
1994	3557742	1960867	619294	6556695
1995	3622858	2055694	567306	6672316
1996	3770930	2370925	597134	7182877
1997	4137005	2334321	587168	7545474
1998	4288228	2833307	696380	8322694
1999	4453596	2598855	782733	8141705
2000	4531112	3238335	788762	8892133

ANEXO 3

Cálculo das emissões de CO₂ resultantes da produção de cimento na Secil-Outão

As emissões de CO₂ resultantes da produção nacional de cimento são calculadas usando a metodologia proposta pelo IPCC (IPCC,a e IPCC, 1996b).

▪ Emissões resultantes da calcinação da matéria prima

As emissões de CO₂ resultantes do processo de calcinação da matéria prima são calculadas a partir da equação abaixo indicada:

$$E_{\text{CO}_2, \text{processo}} \left[\frac{\text{t}_{\text{CO}_2}}{\text{ano}} \right] = P_{\text{clínquer}} [t_{\text{clínquer}}] * FE_{\text{clínquer}} \left[\frac{\text{t}_{\text{CO}_2}}{t_{\text{clínquer}}} \right]$$

com:

$E_{\text{CO}_2, \text{processo}}$ – emissões anuais de CO₂ resultantes da calcinação da matéria prima

$P_{\text{clínquer}}$ – produção anual de clínquer

$FE_{\text{clínquer}}$ – factor de emissão de CO₂ do clínquer

$$F.E._{\text{clínquer}} = 0.5071 [t_{\text{CO}_2} / t_{\text{clínquer}}]$$

(IPCC, 1996a)

A tabela de cálculo é a seguinte:

Ano	Clínquer (t)	Emissões CO ₂ ,processo (tCO ₂)
1990	1564000	793104
1991	1575000	798683
1992	1485000	753044
1993	1476000	748480
1994	1532000	776877
1995	1662000	842800
1996	1622000	822516
1997	1592000	807303
1998	1655000	839251
1999	1720000	872212
2000	1796000	910752

▪ Emissões resultantes da queima de combustível

As emissões de CO₂ resultantes da queima de combustível são calculadas a partir das equações abaixo indicadas:

$$E_{\text{CO}_2 \text{combustão}} \left[\frac{\text{t}_{\text{CO}_2}}{\text{ano}} \right] = E_{\text{CO}_2 \text{carvão / coque}} + E_{\text{CO}_2 \text{fuelóleo}}$$

$$E_{CO2\text{carvão/coque}} \left[\frac{t}{\text{ano}} \right] = C_{\text{carvão/coque}} \left[\frac{kt}{\text{ano}} \right] * PCI_{\text{carvão/coque}} \left[\frac{TJ}{kt} \right] * FE_{\text{carvão/coque}} \left[\frac{t_c}{TJ} \right] * \frac{44}{12} \left[\frac{t_{CO2}}{t_c} \right]$$

$$E_{CO2\text{fuelóleo}} \left[\frac{t}{\text{ano}} \right] = C_{\text{fuelóleo}} \left[\frac{kt}{\text{ano}} \right] * PCI_{\text{fuelóleo}} \left[\frac{TJ}{kt} \right] * FE_{\text{fuelóleo}} \left[\frac{t_c}{TJ} \right] * \frac{44}{12} \left[\frac{t_{CO2}}{t_c} \right]$$

com:

$E_{CO2, \text{combustão}}$ – emissões anuais de CO_2 resultantes da queima de combustível

$E_{CO2, \text{carvão/coque}}$ – emissões anuais de CO_2 resultantes da queima de carvão/coque

$E_{CO2, \text{fuelóleo}}$ – emissões anuais de CO_2 resultantes da queima de fuelóleo

C – consumo anual de combustível

FE – factor de emissão de carbono do combustível

PCI – poder calorífico inferior

$FE_{\text{carvão}} = 26.8 [t_c/TJ]$ (IPCC, 1996a)

$FE_{\text{coque}} = 27.5 [t_c/TJ]$ (IPCC, 1996a)

$FE_{\text{carvão/coque}} = 27.2 [t_c/TJ]$ (estimado)

$FE_{\text{fuelóleo}} = 21.1 [t_c/TJ]$ (IPCC, 1996a)

$PCI_{\text{carvão}} = 29.3 [TJ/kt]$ (IPCC, 1996a)

$PCI_{\text{coque}} = 31.0 [TJ/kt]$ (IPCC, 1996a)

$PCI_{\text{carvão/coque}} = 30.15 [TJ/kt]$ (estimado)

$PCI_{\text{fuelóleo}} = 40.17 [TJ/kt]$ (IPCC, 1996a)

A tabela de cálculo é a seguinte:

Ano	Carvão/Coque (kt)	$E_{CO2 \text{ carvão/coque}}$ (t)	Fuelóleo (kt)	$E_{CO2 \text{ fuelóleo}}$ (t)	$E_{CO2 \text{ combustível}}$ (t)
1990	203	606260	3,5	10877	617137
1991	209	624179	6,4	19890	644069
1992	182	543543	4,0	12431	555974
1993	176	525624	3,6	11188	536812
1994	178	531597	6,4	19890	551487
1995	216	645383	6,9	21444	666827
1996	203	606558	5,8	18025	624584
1997	192	574005	4,7	14607	588612
1998	182	542050	4,7	14607	556656
1999	180	536077	2,2	6837	542914
2000	197	588341	4,2	13053	601393

▪ Emissões resultantes da produção de energia eléctrica

As emissões de CO_2 relacionadas com o uso de electricidade são calculadas a partir da equação abaixo indicada:

$$E_{CO_2,electricidade} \left[\frac{t_{CO_2}}{ano} \right] = C_{electricidade} \left[\frac{GJ}{ano} \right] * FE_{electricidade} \left[\frac{t_{CO_2}}{GJ} \right]$$

com:

$E_{CO_2,electricidade}$ – emissões anuais de CO₂ resultantes da produção de electricidade

$C_{electricidade}$ – consumo anual de electricidade

$FE_{electricidade}$ – factor de emissão de CO₂ da electricidade

$$FE_{electricidade} = 0.1704 [t_{CO_2}/TJ] \quad (MEET Project, 1998)$$

A tabela de cálculo é a seguinte:

Ano	Electricidade (GJ)	Emissões CO ₂ , electricidade (tCO ₂)
1990	610795	104079
1991	680855	116018
1992	635848	108349
1993	619711	105599
1994	634735	108159
1995	622873	106138
1996	629103	107199
1997	675942	115180
1998	702249	119663
1999	704794	120097
2000	722653	123140

▪ Emissões de CO₂ resultantes da produção de cimento na Secil-Outão

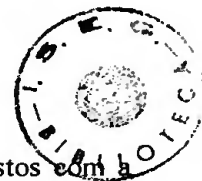
As emissões de CO₂ resultantes da produção de cimento são calculadas somando as contribuições da cada fonte de emissões:

$$E_{CO_2} \left[\frac{t_{CO_2}}{ano} \right] = E_{CO_2,processo} + E_{CO_2,combustão} + E_{CO_2,electricidade}$$

Ano	Emissões CO ₂ , processo (tCO ₂)	Emissões CO ₂ , combustão (tCO ₂)	Emissões CO ₂ , electricidade (tCO ₂)	Emissões totais de CO ₂ (tCO ₂)
1990	617137	793104	104079	1514321
1991	644069	798683	116018	1558769
1992	555974	753044	108349	1417366
1993	536812	748480	105599	1390890
1994	551487	776877	108159	1436523
1995	666827	842800	106138	1615764
1996	624584	822516	107199	1554299
1997	588612	807303	115180	1511096
1998	556656	839251	119663	1515570
1999	542914	872212	120097	1535223
2000	601393	910752	123140	1635285

ANEXO 4

Estimativa dos custos com a energia na Secil-Outão no ano 2000



Os custos com a energia são sub-divididos em custos com a energia eléctrica e custos com a energia térmica.

▪ Estimativa dos custos com a energia eléctrica

Os custos com a energia eléctrica são calculados a partir da equação abaixo indicada:

$$\text{Custos}_{e.\text{eléctrica}} = \text{Preço}_{e.\text{eléctrica}} \left[\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}} \right] * \text{CE}_{e.\text{eléctrica}} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{t}_{\text{clinker}}} \right]$$

com:

$\text{Custos}_{e.\text{eléctrica}}$ – custos com a energia eléctrica

$\text{Preço}_{e.\text{eléctrica}}$ – preço da energia eléctrica

$\text{CE}_{e.\text{eléctrica}}$ – consumo específico de energia eléctrica

$$\text{Preço}_{e.\text{eléctrica}} = 0.075 \text{ [Euros/kWh]} \quad (\text{DGE, 1998})$$

$$\text{CE}_{e.\text{eléctrica}} = 29.4 \text{ [kWh/t}_{\text{clinker}}\text{]} \quad (\text{Secil})$$

Aplicando a equação anterior obtém-se: $\text{Custos}_{e.\text{eléctrica}} = 2.21 \text{ [Euro/t}_{\text{clinker}}\text{]}$

▪ Estimativa dos custos com a energia térmica

Os custos com a energia eléctrica são calculados a partir das equações abaixo indicadas:

$$\text{Custos}_{e.\text{térmica}} = \text{Preço}_{e.\text{térmica}} \left[\frac{\text{Euro}}{\text{MJ}} \right] * \text{CE}_{e.\text{térmica}} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{t}_{\text{clinker}}} \right]$$

$$\text{Preço}_{e.\text{térmica}} = \text{Preço}_{\text{carvão / coque}} \left[\frac{\text{Euro}}{\text{MJ}} \right] * \%_{\text{carvão / coque}} + \text{Preço}_{\text{fuelóleo}} \left[\frac{\text{Euro}}{\text{MJ}} \right] * \%_{\text{fuelóleo}}$$

$$\text{Preço}_{\text{carvão / coque}} \left[\frac{\text{Euro}}{\text{MJ}} \right] = \frac{\text{Preço}_{\text{carvão / coque}} \left[\frac{\text{Euro}}{\text{t}} \right]}{\text{PCI}_{\text{carvão / coque}} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{t}} \right]}$$

$$\text{Preço}_{\text{fuelóleo}} \left[\frac{\text{Euro}}{\text{MJ}} \right] = \frac{\text{Preço}_{\text{fuelóleo}} \left[\frac{\text{Euro}}{\text{t}} \right]}{\text{PCI}_{\text{fuelóleo}} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{t}} \right]}$$

com:

Custos_{e.térmica} – custos com a energia térmica

Preço_{e.térmica} – preço médio da energia térmica

CE_{e.térmica} – consumo específico de energia térmica

PCI_{carvão/coque} – poder calorífico inferior do carvão/coque

Preço_{carvão/coque} = 60 [Euros/t] (Cembureau, 1999)

Preço_{fuelóleo} = 249 [Euros/t] (DGE, 1998)

PCI_{carvão} = 29300 [MJ/kt] (IPCC, 1996a)

PCI_{coque} = 31000 [MJ/kt] (IPCC, 1996a)

PCI_{carvão/coque} = 30150 [MJ/kt] (estimado)

PCI_{fuelóleo} = 40170 [MJ/kt] (IPCC, 1996a)

CE_{e.térmica} = 3379 [MJ/t_{clinker}] (Secil)

Aplicando as equações anterior obtém-se:

Preço_{carvão/coque} = 0.002 [Euros/MJ]

Preço_{fuelóleo} = 0.06 [Euros/MJ]

Preço_{e.térmica} = 0.0025 [Euros/MJ] com 87.7% de carvão/coque + 12.3% fuelóleo

Custos_{e.térmica} = 8.5 [Euro/t_{clinker}]

▪ Custos totais com a energia

Os custos totais com a energia são calculados a partir da equação abaixo indicada:

$$\text{Custos}_{\text{energia}} \left[\frac{\text{Euro}}{\text{t}_{\text{clinker}}} \right] = \text{Custos}_{\text{e.eléctrica}} + \text{Custos}_{\text{e.térmica}}$$

Aplicando os valores calculados obtém-se:

$$\text{Custos}_{\text{energia}} = 10.71 [\text{Euros/t}_{\text{clinker}}]$$

ANEXO 5

Efeito nas emissões de CO₂ da combustão das medidas de redução do consumo específico de energia

O efeito nas emissões de CO₂ das medidas de redução do consumo específico de energia é calculado a partir das equações abaixo indicadas:

$$E_{\text{CO2combustão}} [t_{\text{CO2}}] = CE_{\text{combustível}} \left[\frac{\text{MJ}}{t_{\text{clínquer}}} \right] * P_{\text{clínquer}} [t_{\text{clínquer}}] * FE_{\text{combustível}} \left[\frac{t_{\text{C}}}{\text{MJ}} \right] * \frac{44}{12} \left[\frac{t_{\text{CO2}}}{t_{\text{C}}} \right]$$

$$P_{\text{clínquer}} = 1796000 [t] \quad (\text{Secil})$$

$$FE_{\text{combustível}} = 27.2 * 10^{-6} [t_{\text{C}}/\text{TJ}] \quad (\text{estimado})$$

As equações anteriores serão aplicadas para cada consumo específico de energia calculado segundo as estimativas dos três estudos consultados.

▪ Seguindo as estimativas de De Beer

$$CE_{\text{combustível, De Beer}} = 2756 \text{ a } 3001 \text{ MJ}/t_{\text{clínquer}}$$

$$\text{Aplicando a equação obtém-se: } E_{\text{CO2combustão, De Beer}} = 493658 \text{ a } 537542 \text{ } t_{\text{CO2}}$$

▪ Seguindo as estimativas do Cembureau

$$CE_{\text{combustível, Cembureau}} = 2900 \text{ a } 3200 \text{ MJ}/t_{\text{clínquer}}$$

$$\text{Aplicando a equação obtém-se: } E_{\text{CO2combustão, Cembureau}} = 519451 \text{ a } 573187 \text{ } t_{\text{CO2}}$$

▪ Seguindo as estimativas de Martin

$$CE_{\text{combustível, Martin}} = 2709 \text{ MJ}/t_{\text{clínquer}}$$

$$\text{Aplicando a equação [A] obtém-se: } E_{\text{CO2combustão, Cembureau}} = 485239 \text{ } t_{\text{CO2}}$$